

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Porovnání charakteristik čerpadla měřených na stendech  
Armfield FM50 a Armfield FM51

Comparison of the Pump Characteristics Measured on the  
Armfield FM50 and Armfield FM51 Demonstration Units

Student:

Michal Abrahánek

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## **Zadání bakalářské práce**

Student: **Michal Abrahánek**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení  
Téma: **Porovnání charakteristik čerpadla měřených na stendech Armfield FM50 a Armfield FM51**  
**Comparison of the Pump Characteristics Measured on the Armfield FM50 and Armfield FM51 Demonstration Units**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popište měřicí zařízení fy Armfield FM50 a FM51.
2. Zpracujte popis odstředivého čerpadla a jeho funkci v čerpacím systému.
3. Popište kinematické poměry v oběžném kole radiálního čerpadla a odvození teoretické měrné energie.
4. Proveďte měření charakteristiky stejného čerpadla na rozdílných stendech pro obě oběžná kola.
5. Výsledky měření na stendu Armfield FM50 a FM51 porovnejte a vyhodnoťte.

Seznam doporučené odborné literatury:

- BLÁHA, J., BRADA, K. *Příručka čerpací techniky*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997. 289 s. ISBN 80-01-01626-9.
- STRÝČEK, O. *Hydrodynamické čerpadlá*. 2. vyd. Bratislava: STU, 1994. 297 s. ISBN 80-227-0662-0.
- PACIGA, A. a kol. *Čerpací technika*. Bratislava: ALFA, 1984. 223 s.
- Melichar, J., Bláha, J. *Problematika soudobé čerpací techniky*. Praha: ČVUT, 2007. 265 s. ISBN 978-80-01-03719-5.
- Blejchař, T., Drábková, S. *Čerpací technika a potrubí, návody do cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010. 76 s. ISBN 978-80-248-2205-1.
- BRENNEN, C. E. *Hydrodynamics of Pumps*. [online] Datum poslední revize 16.11.2015. Dostupné z <<http://authors.library.caltech.edu/25019/3/pumbook.pdf>>
- BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace podle dokumentů ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2 část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typů dokumentů*. [online], Datum poslední revize 11.11.2004. Dostupné z <<http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf>>

Porovnání charakteristik čerpadla měřených na stendech Armfield FM50 a Armfield FM51

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



---

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík  
vedoucí katedry



---

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 16. 5. 2016


.....  
Abdullah

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: .....16.5.2016

.....

podpis

Jméno a příjmení autora:

Michal Abrahánek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Lesná 512/4

Mostkovice 798 02

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**ABRAHÁMEK, M.** *Porovnání charakteristik čerpadla měřených na stendech Armfield FM50 a Armfield FM51: Bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2016, 47 s. Vedoucí práce: Drábková, S.

Bakalářská práce se zabývá měřením charakteristik hydrodynamického čerpadla na dvou odlišných stendech *Armfield FM50* a *Armfield FM51* při různých otáčkách a následným porovnáním naměřených veličin. V prvních kapitolách jsou popsána zařízení *Armfield FM50* a *Armfield FM51* včetně obou použitých oběžných kol. V dalších kapitolách je popsáno měření a výpočet charakteristik, příkonů a účinností. V grafech je potom vyobrazen a porovnán průběh naměřených charakteristik. V závěru je provedeno porovnání pro oba stendy firmy *Armfield*.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

**ABRAHÁMEK, M.** *Comparison of the Pump Characteristics Measured on the Armfield FM50 and Armfield FM51 Demonstration Units: Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2016, 47 p. Thesis head: Drábková, S.

The thesis deals with the measurement of characteristics of hydrodynamic pump on two different stands, *Armfield FM50* and *Armfield FM51*, at different speeds and then comparing the measured values. In the first chapters, I describe the devices *Armfield FM50* and *Armfield FM51* including two impellers used. In the other chapters I describe the measurement and calculation of characteristics, power consumption and efficiency. The progress of the measured characteristics is then shown and compared in graphs. In conclusion there is a comparison for both *Armfield* stands.

## Obsah

<b>Seznam použitých označení.....</b>	<b>8</b>
<b>0. Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>1. Popis měřicích zařízení .....</b>	<b>11</b>
1.1. Měřicí zařízení Armfield FM50 .....	11
1.2. Měřicí zařízení Armfield FM51 .....	14
1.3. Oběžná kola.....	19
1.4. Řídicí jednotka .....	21
<b>2. Měření.....</b>	<b>22</b>
2.1. Zařízení Armfield FM50 .....	22
2.1.1. Postup měření .....	23
2.1.2. Oběžné kolo s lopatkou zahnutou dozadu (rychloběžné) .....	24
2.1.3. Oběžné kolo s lopatkou zahnutou dopředu (pomaluběžné).....	27
2.2. Zařízení Armfield FM51 .....	29
2.2.1. Postup měření .....	29
2.2.2. Oběžné kolo s lopatkou zahnutou dozadu (rychloběžné) .....	29
2.2.3. Oběžné kolo s lopatkou zahnutou dopředu (pomaluběžné).....	31
<b>3. Grafické porovnání stendů Armfield FM50 a Armfield FM51.....</b>	<b>34</b>
3.1. Porovnání čerpadlových charakteristik obou oběžných kol.....	34
3.2. Porovnání příkonů obou oběžných kol .....	35
3.3. Porovnání účinností obou oběžných kol .....	36
3.4. Porovnání čerpadlových charakteristik na obou stendech .....	37
3.5. Afinní vztahy.....	38
<b>4. Charakteristika potrubí a určení provozních bodů .....</b>	<b>39</b>
4.1. Potrubí zařízení Armfield FM50 .....	41
4.2. Potrubí zařízení Armfield FM51 .....	43
<b>5. Závěr .....</b>	<b>45</b>
<b>6. Seznam použité literatury .....</b>	<b>47</b>

## Seznam použitých označení

$n$	otáčky	$[\text{min}^{-1}]$
$P_h$	hydraulický výkon čerpadla	$[\text{W}]$
$P$	příkon čerpadla	$[\text{W}]$
$p_s$	tlak na sání čerpadla	$[\text{Pa}]$
$p_v$	tlak na výtlaku čerpadla	$[\text{Pa}]$
$Q, Q_v$	objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
$t$	teplota	$[\text{°C}]$
$t$	krouticí moment	$[\text{Nm}]$
$v$	rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$v_s$	rychlost na vstupu do čerpadla	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$v_v$	rychlost na výstupu z čerpadla	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$d_s$	průměr sacího potrubí	$[\text{m}]$
$d_v$	průměr výtlačného potrubí	$[\text{m}]$
$l_s$	délka sacího potrubí	$[\text{m}]$
$l_v$	délka výtlačného potrubí	$[\text{m}]$
$l$	celková délka potrubí	$[\text{m}]$
$H$	celková výtlačná výška čerpadla	$[\text{m}]$
$Y$	měrná energie čerpadla	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Y_{stat}$	statická měrná energie čerpadla	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Y_{zs}$	ztrátová měrná energie na sání čerpadla	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Y_{zv}$	ztrátová měrná energie na výtlaku čerpadla	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Y_z$	celková ztrátová měrná energie čerpadla	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$\eta$	účinnost	$[\%]$
$\nu$	kinematická viskozita	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$\rho$	hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$



Porovnání charakteristik čerpadla měřených na stendech Armfield FM50 a Armfield FM51

$Re$	Reynoldsovo číslo	[1]
$\lambda$	součinitel tření	[1]
$\zeta$	součinitel místní ztráty	[1]

## **0. Úvod**

V této bakalářské práci se zabývám měřením charakteristik hydrodynamického čerpadla na stendech *Armfield FM50* a *Armfield FM51* za různých otáček a za chodu dvou různých oběžných kol.

Čerpadla jsou instalována v laboratoři čerpací techniky a slouží k výuce více předmětů spojených s prouděním a dopravou kapalin. Demonstrační zařízení *Armfield FM50* je určeno pro jedno čerpadlo, zatímco druhý stand *Armfield FM51* umožňuje měření charakteristik jednoho čerpadla i dvou čerpadel v sériovém nebo paralelním řazení.

V obou případech je ale použito čerpadlo stejného typu, které je zasazeno do jiného hydraulického obvodu a pracuje s mírně odlišnými výkonovými parametry.

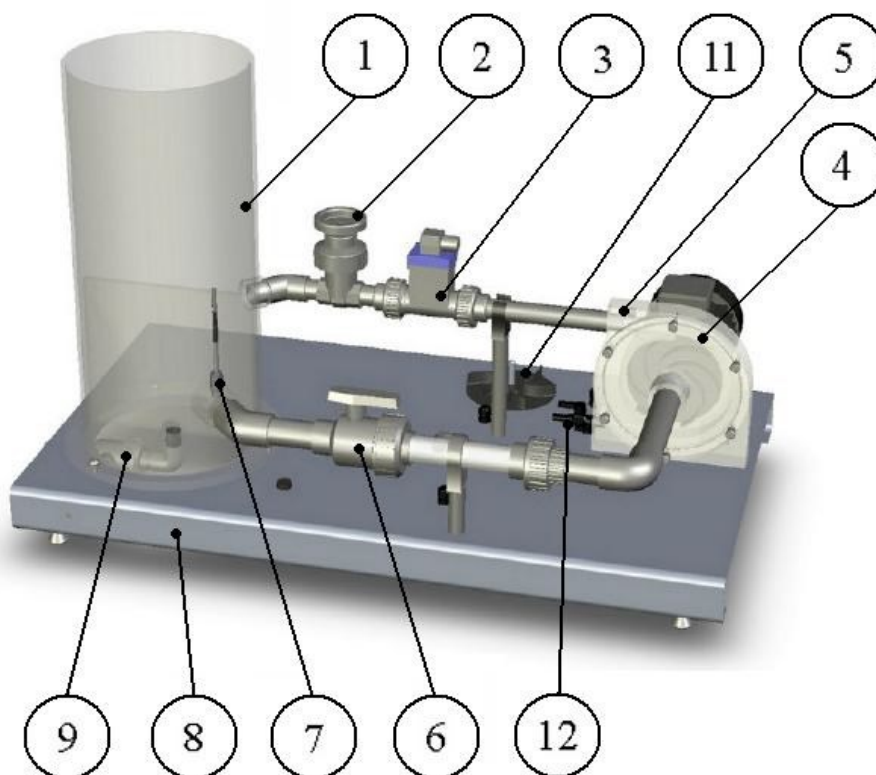
## 1. Popis měřicích zařízení

### 1.1. Měřicí zařízení Armfield FM50

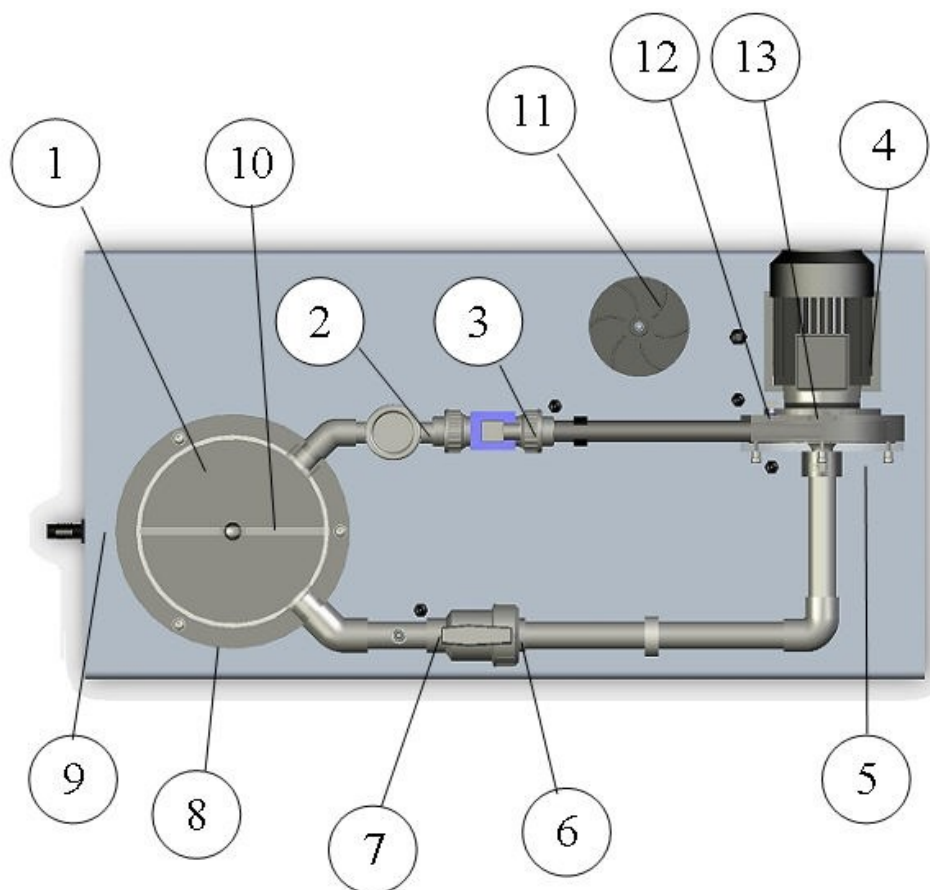
Demonstrační zařízení *Armfield FM50* (Obrázek 1, 2, 3) obsahuje nádrž a potrubní systém sloužící k přívodu a odvodu dopravované kapaliny (v tomto případě vody) k odstředivému čerpadlu. V potrubním systému jsou vloženy snímače ke snímání teploty, tlaku na sání a na výtlaku čerpadla, průtoku a krouticího momentu při měření v různých režimech čerpadla. Naměřené hodnoty jednotlivých veličin jsou přenášeny do počítače přes řídicí jednotku. Snímané hodnoty je možné vyhodnotit v software k příslušnému stendu. Zařízení *Armfield FM50* se spolu s druhým zařízením *Armfield FM51* nachází na VŠB – TUO v místnosti E309.

Otáčky odstředivého čerpadla je možné měnit od 0 % do 100 %, ale u otáček pod 60 % už musíme počítat s nepřesností měření. Ve výtlacném potrubí je umístěn ventil pro změnu výstupního tlaku vlivem škrcení průtoku, který společně s proměnnými otáčkami motoru čerpadla umožňuje měřit charakteristiky čerpadla v celém rozsahu jeho parametrů. V sacím potrubí je také umístěn ventil, kterým jde škrtit průtok na sání čerpadla a vyhodnotit jeho kavitační vlastnosti. K dispozici je i druhé oběžné kolo, které lze vyměnit a porovnat tak parametry čerpadla s různými tvary lopatek oběžného kola.

Na následujících obrázcích jsou popsány části zařízení FM50:



Obrázek 1 – Zařízení pro měření charakteristik jednoho čerpadla Armfield FM50 (zepředu)



Obrázek 2 – Zařízení pro měření charakteristik jednoho čerpadla Armfield FM50  
(shora)

**Nádrž [1]** – je vyrobena z průhledného akrylátu a je upevněna na základnu. Nádrž se naplňuje vodou pomocí otevřené horní části. Ve spodní části je sací potrubí, kterým se přivádí kapalina k čerpadlu a po průchodu čerpadlem zpět výtlačným potrubím do nádrže. Přepážka uprostřed nádrže slouží ke snížení rotování kapaliny v nádrži důsledkem výtlačku.

**Škrticí ventil na výtlaku [2]** – slouží k nastavení velikosti průtoku. Velikost průtoku je nastavována manuálně kohoutem.

**Průtokoměr [3]** – turbínový průtokoměr, který slouží pro měření velikosti průtoku v čerpacím systému a je umístěn ve výtlačném potrubí. Výstup ze snímače je zobrazen na počítači v software FM50.

**Čerpadlo [4]** – odstředivé čerpadlo, které je poháněné elektromotorem s měničem frekvence k ovládání rychlosti otáčení rotoru čerpadla s využitím software FM50. Tělo čerpadla a přední kryt jsou vyrobeny z průhledného akrylátu. Přední kryt je přichycen pomocí šesti šroubů a je utěsněn pomocí O-kroužku. Po odejmutí předního krytu je možné vyměnit oběžná kola.

**Snímače tlaku [5] a [13]** – dva elektronické tlakové snímače, které jsou zapojeny v čerpacím systému a slouží pro měření velikosti tlaku na vstupu a výstupu z čerpadla.

**Škrticí ventil na sání [6]** – slouží pro vyšetření vlivu sací výšky na provoz čerpadla a pozorování vzniku kavitace. Jedná se o kulový ventil a ve většině příkladů je tento ventil plně otevřen (rukojeť je ve směru potrubí). Pokud je plně uzavřen, je poloha rukojeti kolmo k potrubí.

**Snímač teploty [7]** – umístěn na počátku sacího potrubí hned za nádrží. Slouží k měření teploty vody vstupující do potrubního systému.

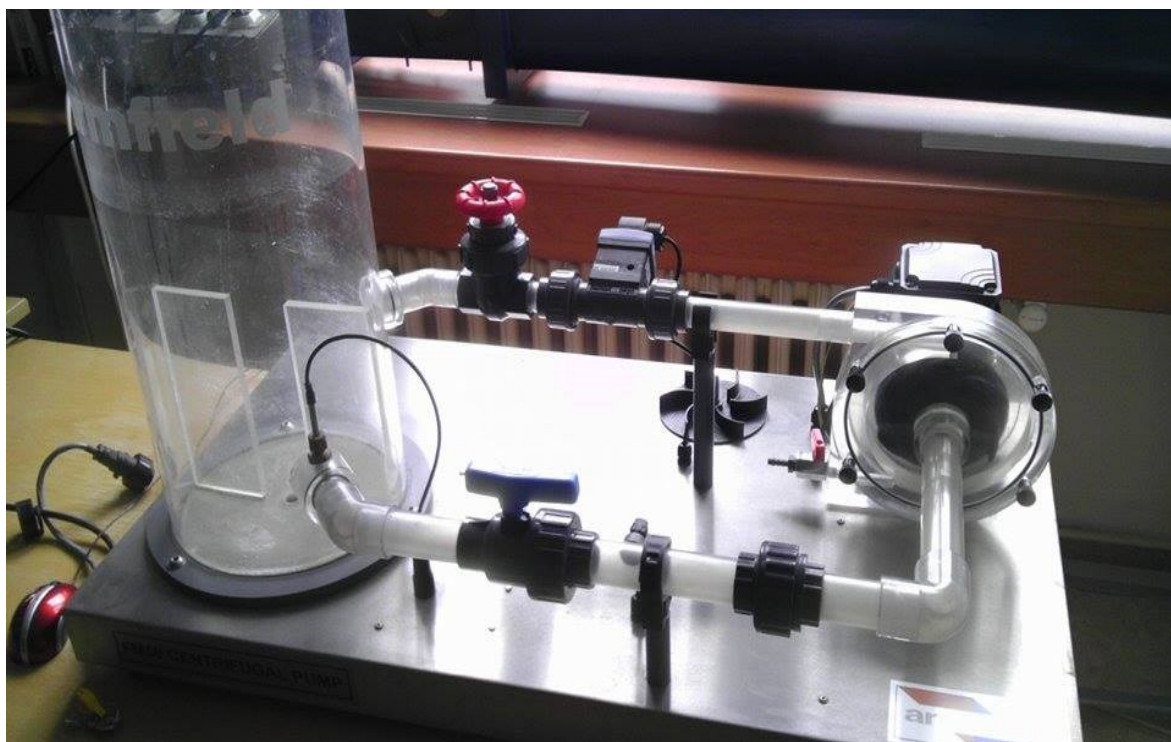
**Základna [8]** – slouží k podložení ostatních částí zařízení.

**Vypouštěcí ventil [9]** – umístěn ve dně nábody. Jde jím nádrž zcela vypustit.

**Přepážka v nádrži [10]** – slouží ke snížení rotace kapaliny v nádrži.

**Oběžné kolo [11]** – k demonstračnímu zařízení FM50 jsou dostupné dva typy oběžného kola (s lopatkou zahnutou dopředu a s lopatkou zahnutou dozadu). Je možné vyšetřit rozdíl v obou konstrukcích pomocí měření. Oběžné kolo, které není použito k měření vidíme na pozici [11].

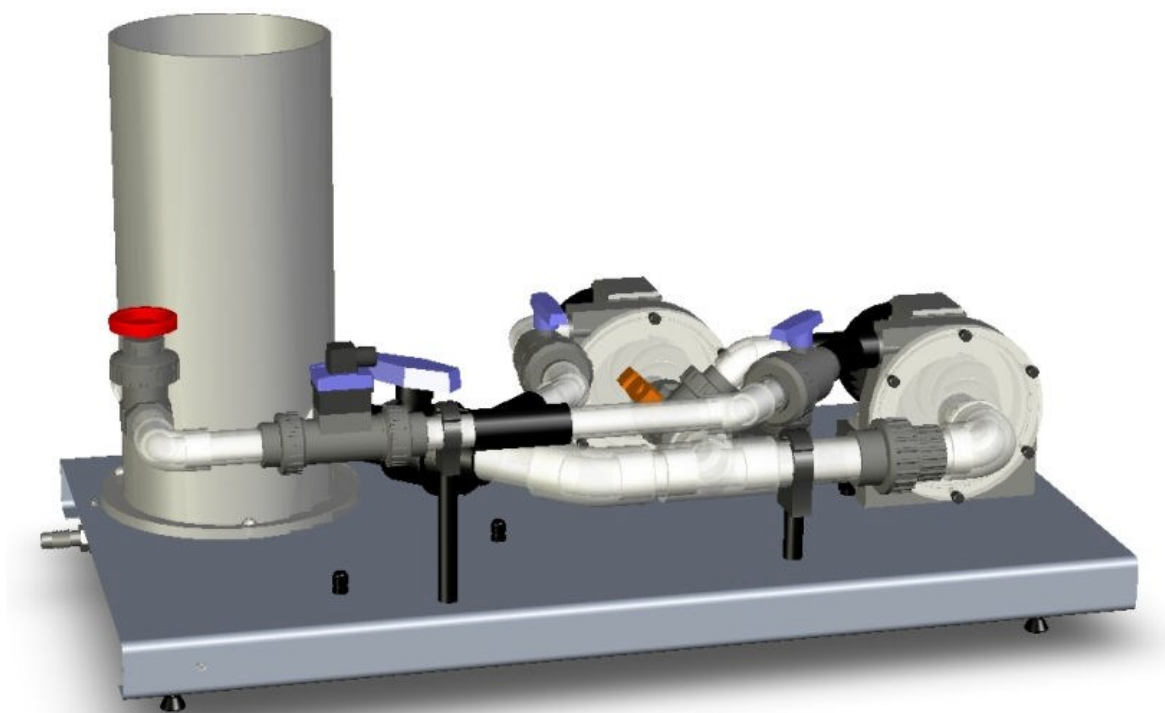
**Vypouštěcí ventil [12]** – slouží k vypuštění vody zachycené v čerpadle po vypuštění nádrže. Během měření by měl být ventil uzavřen.



*Obrázek 3 Měřicí zařízení Armfield FM50 (bez kapaliny)*

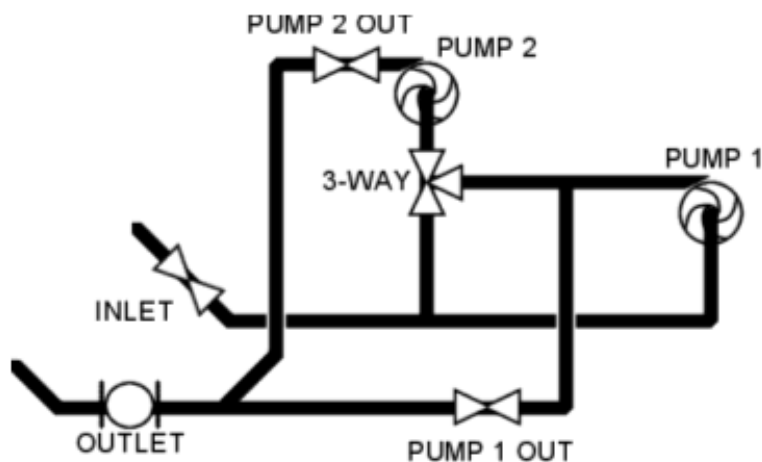
## 1.2. Měřicí zařízení Armfield FM51

Demonstrační zařízení *Armfield FM51* (Obrázek 4, 9, 10, 11) se skládá ze 2 odstředivých čerpadel. Tyto čerpadla jsou poháněna elektromotory. Obě čerpadla jsou připojena k potrubnímu systému, který je zapojen do okruhu s nádrží. Ve výtlačném potrubí je škrtkový ventil, který slouží pro regulaci průtoku čerpadla. V sacím potrubí se nachází druhý škrtkový ventil. Dále se zde nachází třicestný ventil sloužící k nastavení směru toku vody z prvního čerpadla k řazení čerpadel do série či paralelně nebo k zablokování druhého čerpadla k měření pouze prvního čerpadla. Zařízení se rovněž jako stend *Armfield FM50* nachází na VŠB – TUO v místnosti E309.



*Obrázek 4 – Zařízení pro měření paralelní a sériové spolupráce dvou čerpadel FM51*

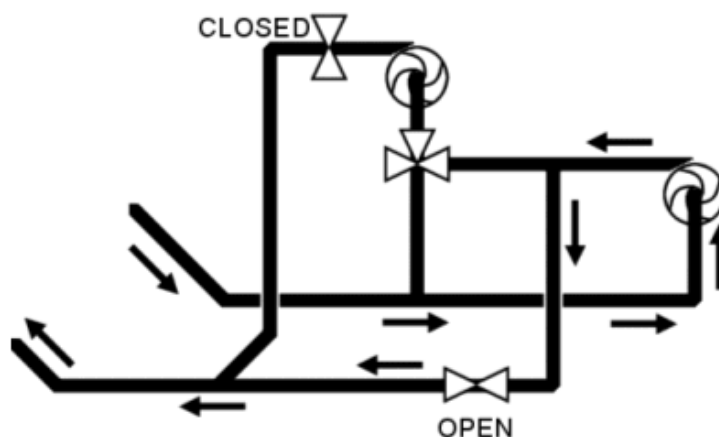
V potrubním systému se nachází několik snímačů, které jsou zde pro měření tlaků, průtoku či teploty vody. Komunikaci mezi stendem a počítačem zařizuje řídicí jednotka. Prostřednictvím software firmy *Armfield* k tomuto zařízení je možno zapínat a vypínat elektromotory u obou čerpadel a u prvního čerpadla plynule měnit jeho otáčky v rozsahu od 0 % do 100 %. V software jsou vidět i záznamy veličin ze zmíněných snímačů v obvodu.



Obrázek 5 Schéma obvodu zařízení FM51

Je možné měřit jak samostatně první čerpadlo, tak i sériovou či paralelní spolupráci čerpadel. K tomuto slouží třicestný ventil nacházející se v potrubí, jehož nastavením je možné docílit měření uvedených konfigurací čerpadel.

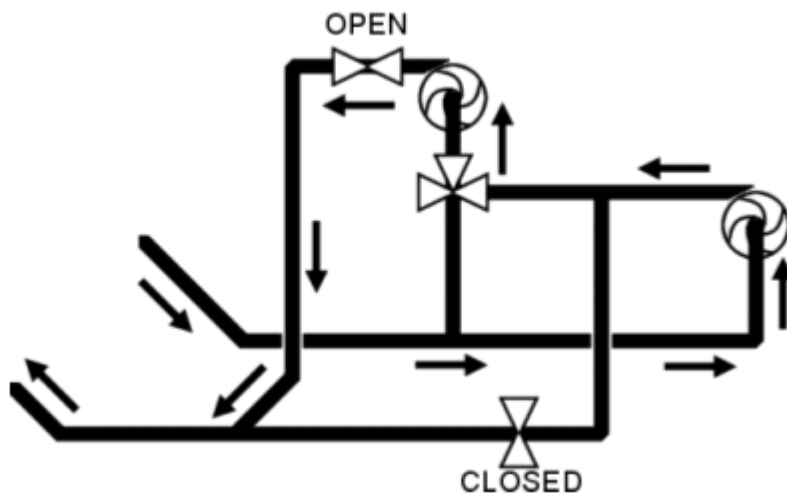
Pro měření charakteristiky **samostatného** čerpadla je nutné nastavit ventily v obvodu následovně:



Obrázek 6 – Uspořádání ventilů v obvodu pro měření charakteristiky samostatného čerpadla

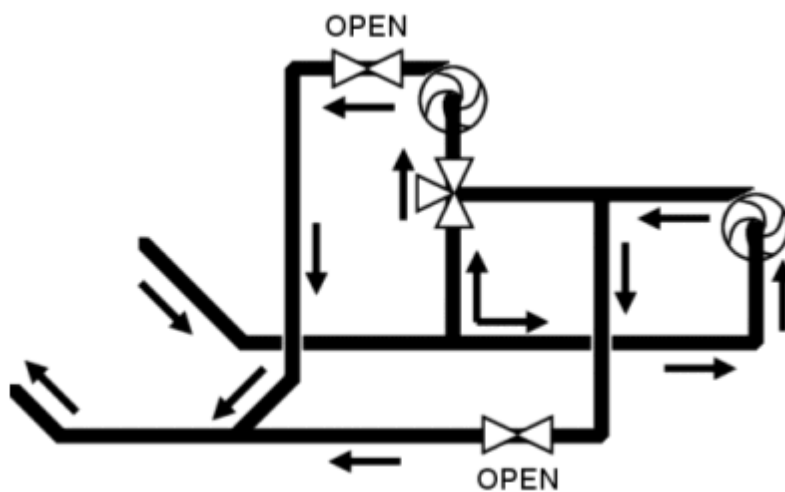
Toto byl jediný způsob měření, který se používal pro tuto bakalářskou práci. Jiné nastavení nebylo použito.

Pro měření charakteristiky pro **sériovou** spolupráci dvou čerpadel je nutno nastavit čáasti obvodu ventil tak, jak popisuje následující obrázek:



Obrázek 7 Uspořádání ventilů v obvodu pro sériovou spolupráci dvou čerpadel

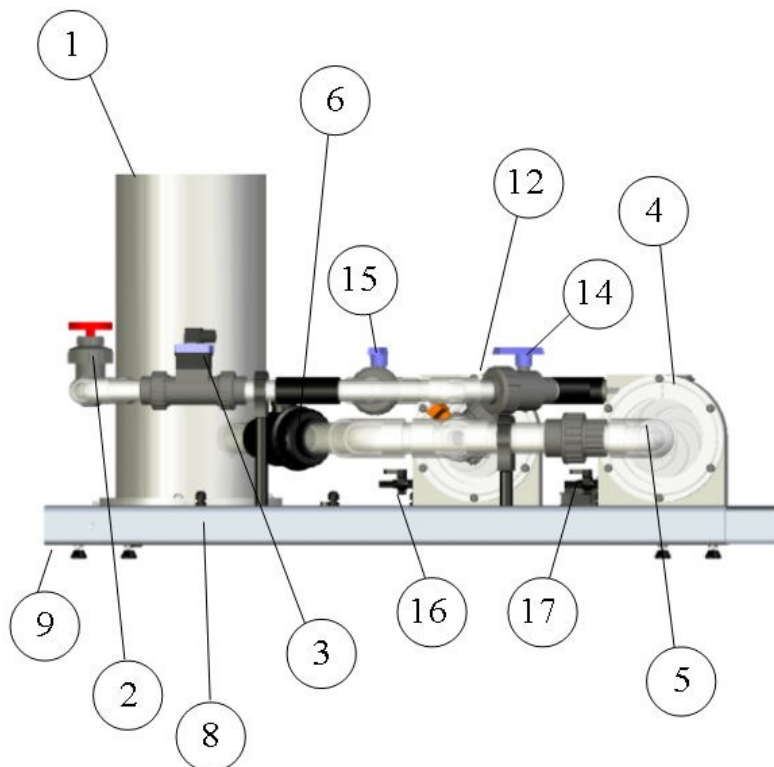
Pro měření charakteristiky pro **paralelní** spolupráci dvou čerpadel je nutno nastavit obvod dle následujícího obrázku:



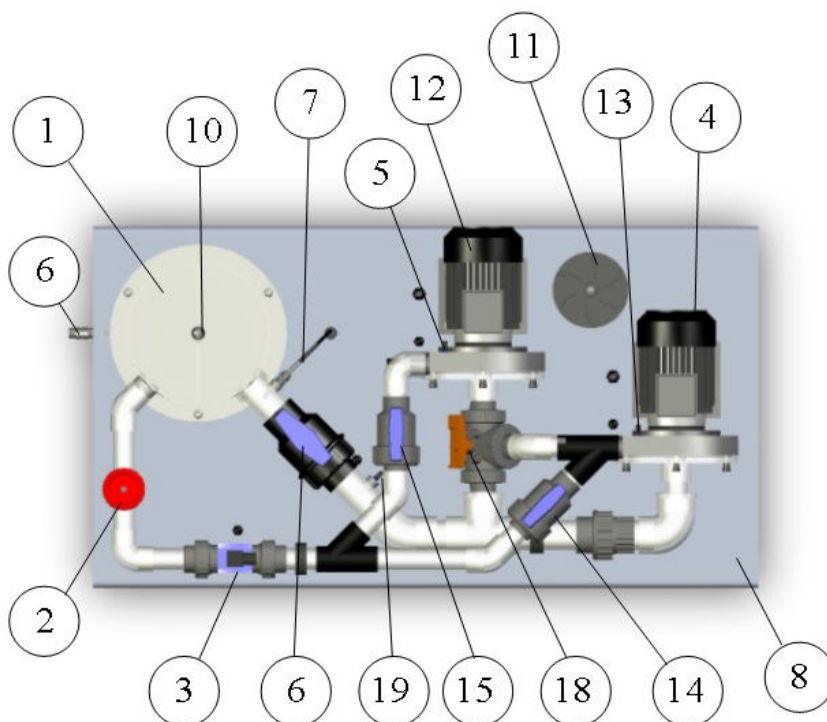
Obrázek 8 Uspořádání ventilů v obvodu pro paralelní spolupráci dvou čerpadel



Na následujících obrázcích jsou znázorněny a popsány části zařízení *Armfield FM51* pro měření samostatného čerpadla nebo paralelní či sériové spolupráce dvou čerpadel:



Obrázek 9 Zařízení pro měření charakteristik čerpadel v sériové či paralelní spolupráci FM51 (zepředu)



Obrázek 10 Zařízení pro měření charakteristik čerpadel v sériové či paralelní spolupráci FM51 (shora)

**Nádrž [1]** – je vyrobena z průhledného plastu a je upevněna na základnu. Nádrž se naplňuje vodou pomocí otevřené horní části. Ve spodní části je spojena se sacím potrubím, kterým se přivádí kapalina k čerpadlu a po průchodu čerpadlem zpět výtlačným potrubím do nádrže. Přepážka uprostřed nádrže slouží ke snížení rotování kapaliny v nádrži důsledkem výtlačku.

**Škrticí ventil na výtlačku [2]** – tímto ventilem se nastavuje velikost průtoku celým systémem. Velikost průtoku je nastavována manuálně otáčením kohoutu.

**Průtokoměr [3]** – turbínový průtokoměr, který slouží pro měření velikosti průtoku celým systémem a nachází se ve výtlačném potrubí. Výstup ze snímače je zobrazen v software FM51.

**Čerpadla [4] a [12]** – odstředivá čerpadla poháněná elektromotorem. Čerpadlo č. 1 je opatřeno měničem frekvence k ovládání rychlosti otáčení rotoru čerpadla s využitím software FM51. Čerpadlo č. 2 je identické s čerpadlem č. 1 při 80% otáček rotoru. Otáčky čerpadla č. 2 jsou pevně stanoveny na jmenovité otáčky. Těla čerpadel a přední kryty jsou vyrobeny z průhledného plastu podobně jako nádrž.

**Snímače tlaku [5], [12] a [19]** – elektronické tlakové snímače, které jsou zapojeny v systému a slouží pro měření velikosti tlaku na vstupu do čerpadla a výstupu z něj. Výstupy z těchto senzorů jsou zobrazeny v software FM51.

**Škrticí ventil na sání [6]** – slouží pro vyšetření vlivu sací výšky na provoz čerpadla a pozorování vzniku kavitace. Jedná se o kulový ventil a ve většině příkladů, které jsou popsány dále, je tento ventil plně otevřen (rukojeť je ve směru potrubí). Pokud, je plně uzavřen, je poloha rukojeti kolmo k potrubí.

**Snímač teploty [7]** – nachází se na počátku sacího potrubí hned za nádrží. Slouží k měření teploty vody vstupující do systému potrubí.

**Základna [8]** – slouží pro uchycení dalších částí demonstračního zařízení.

**Vypouštěcí ventil [9]** – je umístěn ve dně nádoby. Jde jím zcela vypustit nádrž.

**Dno nádoby [10]** – je potrubím propojeno s **vypouštěcím ventilem [9]**.

**Oběžné kolo [11]** – k demonstračnímu zařízení FM51 jsou dostupné dva typy oběžného kola (s lopatkou zahnutou dopředu a s lopatkou zahnutou dozadu). Je možné vyšetřit rozdíl v obou konstrukcích pomocí měření. Oběžné kolo, které není použito k měření vidíme na pozici [11].

**Ventily na výstupu z čerpadel [14] a [15]** – Každé čerpadlo je na svém výstupu opatřeno kulovým ventilem. Tyto ventily slouží k hrazení průtoku systémem potrubí vzhledem ke zvolené úloze pro měření. Volby smyslu proudění může být dosaženo jen ve spojení s nastavením **třicestného ventilu [18]**.

**Vypouštěcí ventily [16] a [17]** – slouží k vypuštění vody zachycené v čerpadlech po vypuštění nádrže. Během měření by měly být tyto ventily zcela zavřeny.

**Třicestný ventil [18]** – je umístěn blízko vstupu do čerpadla č. 2. Tento ventil slouží k nastavení smyslu proudění na sériové, paralelní řazení, či k měření samostatného čerpadla. Na horní straně kohoutu je vyznačen smysl proudění tímto ventilem. Tento ventil by měl být správně nastaven pro dané měření.



*Obrázek 11 Měřicí zařízení Armfield FM51*

### **1.3. Oběžná kola**

V této konkrétní práci používáme dvě oběžná kola. Jedním z oběžných kol je oběžné kolo s lopatkou zahnutou dozadu.

Druhým typem oběžného kola je oběžné kolo s lopatkou zahnutou dopředu.

V porovnání těchto kol si můžeme všimnout několika rozdílů a společných vlastností. Například toho, že obě oběžná kola mají stejný počet lopatek. Lopatky u oběžného kola s lopatkou zahnutou dopředu jsou kratší a tím více otevřeny, kdežto u oběžného kola s lopatkou zahnutou dozadu jsou lopatky delší. Tím pádem nechávají méně místa na průtok kapaliny. Obě oběžná kola mají 6 lopatek a mají stejný vnitřní i vnější průměr.



*Obrázek 12 Porovnání oběžných kol s lopatkou zahnutou dozadu - rychloběžné (vlevo) a s lopatkou zahnutou dopředu (pomaloběžné)*

V oběžném kole dochází ke transformaci mechanické energie rotoru na kinetickou energii kapaliny, v mém případě vody. Kinematické poměry v oběžném kole jsou popsány vektory rychlostí  $\vec{c}$ ,  $\vec{v}$ ,  $\vec{u}$ , kde

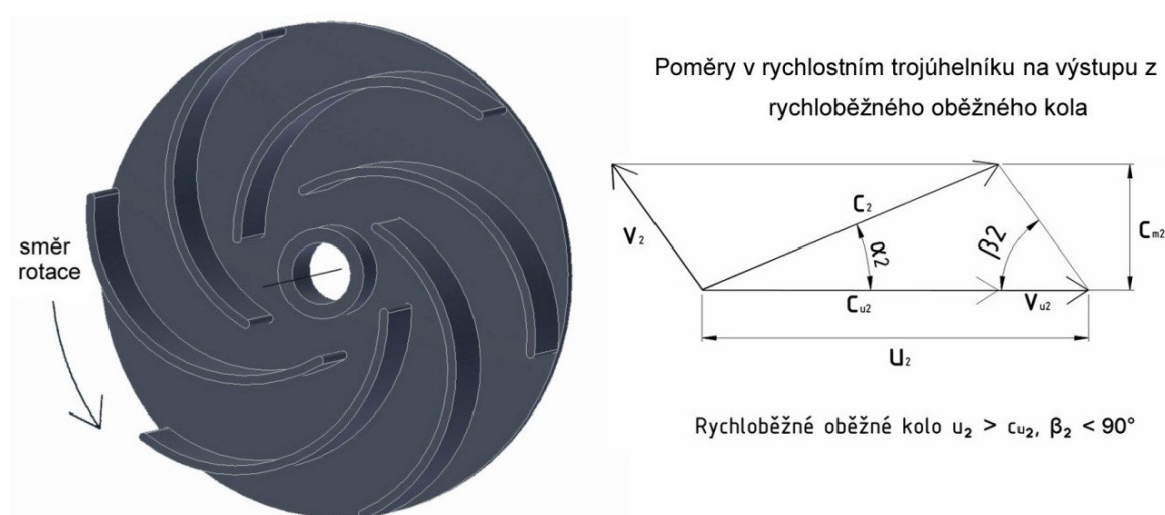
$\vec{c}$  je absolutní rychlost kapaliny (rychlost vůči pozorovateli),

$\vec{v}$  je relativní rychlost kapaliny vzhledem k lopatkám a diskům oběžného kola a

$\vec{u}$ , což je unášivá (obvodová) rychlost čerpadla

Kinematické poměry v oběžném kole čerpadla jsou znázorněny na následujících obrázcích. Přeměna mechanické energie na energii hydraulickou začíná na vstupní hraně oběžné lopatky a končí na její výstupní hraně.

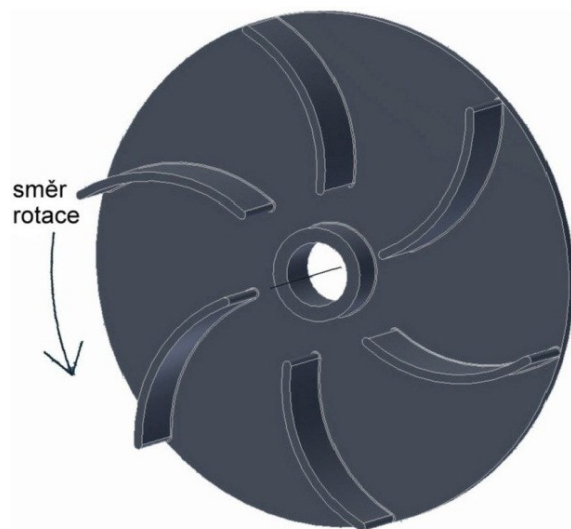
Kinematické poměry můžeme znázornit ve formě rychlostních trojúhelníků, jejichž základnu tvoří unášivá (obvodová) rychlost. Vektor absolutní rychlosti s ní svírá úhel  $\alpha$  a vektor rychlosti relativní úhel  $\beta$ , což je úhel lopatky.



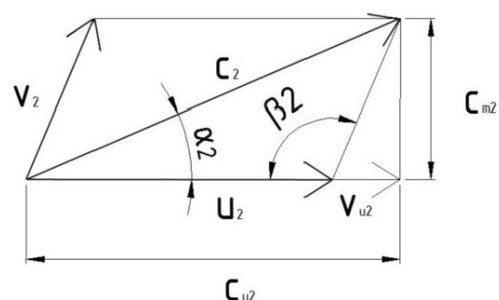
Obrázek 13 Oběžné kolo s lopatkami zahnutými dozadu (rychloběžné)

Obrázky byly vyrobeny v grafickém programu *Autodesk Inventor Professional* a byly převzaty z diplomové práce uvedené v seznamu literatury [6]:

**KOCUR, J.** *Vyšetření vlivu tvaru lopatky radiálního oběžného kola na charakteristiky odstředivého čerpadla s využitím numerického modelování proudění: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2012, 74 s.*



Poměry v rychlostním trojúhelníku na výstupu z pomaluběžného oběžného kola



Pomaluběžné oběžné kolo  $u_2 < c_2$ ,  $\beta_2 > 90^\circ$

Obrázek 14 Oběžné kolo s lopatkami zahnutými dopředu (pomaluběžné)

## 1.4.Řídicí jednotka

Na řídicí jednotku jsou napojeny snímače teploty, tlaku, příkonu a průtoku z hydraulického obvodu. Odtud jsou informace přenášeny přes USB kabel do počítače, kde mohou poté být ukládány pomocí speciálního softwaru. Řídicí jednotka musí být napojena na zdroj elektrického proudu a zapnuta červeným vypínačem.



Obrázek 15 - Řídicí jednotka (pohled zepředu)



Po měření na standu FM50 bylo zjištěno, že v počítači se nesprávně zobrazuje točivý moment čerpadla, který byl po celou dobu konstatní. To ovlivnilo i výslednou účinnost. Vyměněním řídicí jednotky za náhradní kus bylo následně zjištěno, že chyba byla na straně řídicí jednotky.

Motor 1 Torque t [Nm]	Total Hydraulic Power [W]	Pump 1 Mechanical Power [W]	Pump 1 Efficiency E1 [%]	Pump 2 Efficiency E2 [%]	Overall Efficiency Egr [%]
3,16	16,3	477,2	3,4		3,4
3,16	16,3	477,2	3,4		3,4
3,16	16,0	477,2	3,4		3,4
3,16	15,0	477,2	3,1		3,1
3,16	14,1	477,2	3,0		3,0
3,16	11,7	477,2	2,5		2,5
3,16	10,1	477,2	2,1		2,1
3,16	7,8	477,2	1,6		1,6
3,16	6,3	477,2	1,3		1,3
3,16	4,7	477,2	1,0		1,0
3,16	2,4	477,2	0,5		0,5
3,16	1,6	477,2	0,3		0,3
3,16	0,0	477,2	0,0		0,0

Obrázek 16 - Ukázka chybného točivého momentu a účinnosti

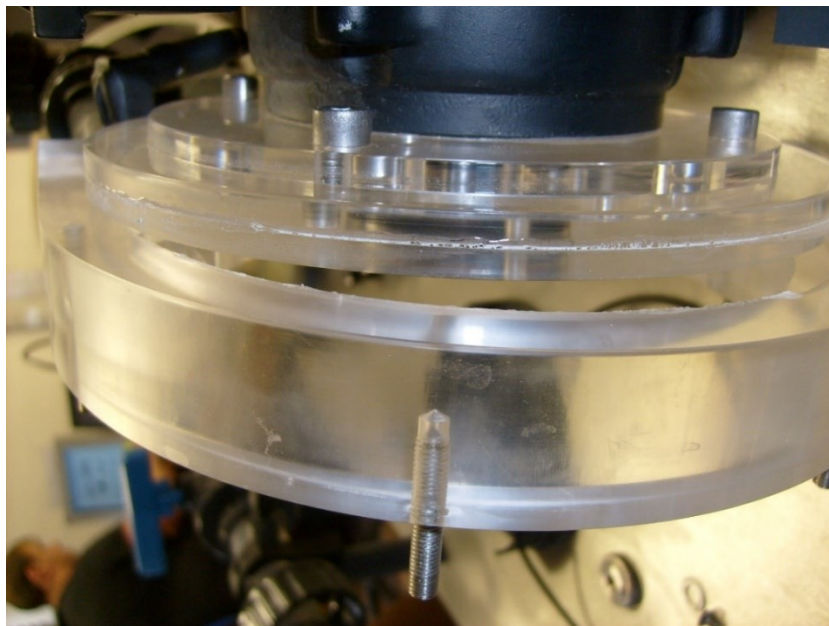
## 2. Měření

Předmětem měření bylo zjistit vliv oběžného kola na čerpadlovou charakteristiku, účinnost a příkon hydraulického obvodu.

### 2.1. Zařízení Armfield FM50

V průběhu měření došlo k prasknutí plexisklového krytu čerpadla a nebylo možné v práci na tomto standu pokračovat (viz Obrázek 19). Bylo nutné kontaktovat dodavatele standu a nepodařilo se závadu v průběhu semestru odstranit. Proto byla data měření na tomto standu pro obě oběžná kola převzata z níže uvedené diplomové práce [6].

**KOCUR, J.** *Vyšetření vlivu tvaru lopatky radiálního oběžného kola na charakteristiky odstředivého čerpadla s využitím numerického modelování proudění: Diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2012, 74 s.



Obrázek 17 Prasklý kryt oběžného kola u demonstračního zařízení FM50

### 2.1.1. Postup měření

Počítač připojíme k řídicí jednotce daného hydraulického obvodu a utáhneme škrtkový ventil na výtlaku. Potom postupně povolujeme škrtkový ventil a pomocí počítače měříme jednotlivé body průtoku daným utáhnutím škrtkového ventilu. Postupně měříme pro otáčky  $900 \text{ min}^{-1}$ ,  $1050 \text{ min}^{-1}$ ,  $1200 \text{ min}^{-1}$ ,  $1350 \text{ min}^{-1}$  a  $1500 \text{ min}^{-1}$ , což je 60 – 100 % maximálních otáček rotoru čerpadla. Měření byla realizována pro obě oběžná kola. Pro vyhodnocení naměřených veličin byly použity následující vztahy:

Pro hydraulický výkon  $P_h$ :

$$P_h = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g \text{ [W]}$$

kde  $H$  [m] je dopravní výška,

$Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] je průtok,

$\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] je hustota,

$g$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] je tíhové zrychlení.

Pro příkon  $P$ :

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{60} \text{ [W]}$$

kde  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] jsou otáčky,

Pro účinnost  $\eta$ :

$$\eta = \frac{P_h}{P} \cdot 100 \text{ [%]}$$

## 2.1.2. Oběžné kolo s lopatkou zahnutou dozadu (rychlloběžné)

### Příklady výpočtů:

$$P_h = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g = 2,48 \cdot 0,00057 \cdot 997 \cdot 9,81 = 13,85 \text{ W}$$

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1200 \cdot 0,58}{60} = 73,24 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_h}{P} \cdot 100 = \frac{13,8}{73,2} \cdot 100 = 18,91 \%$$

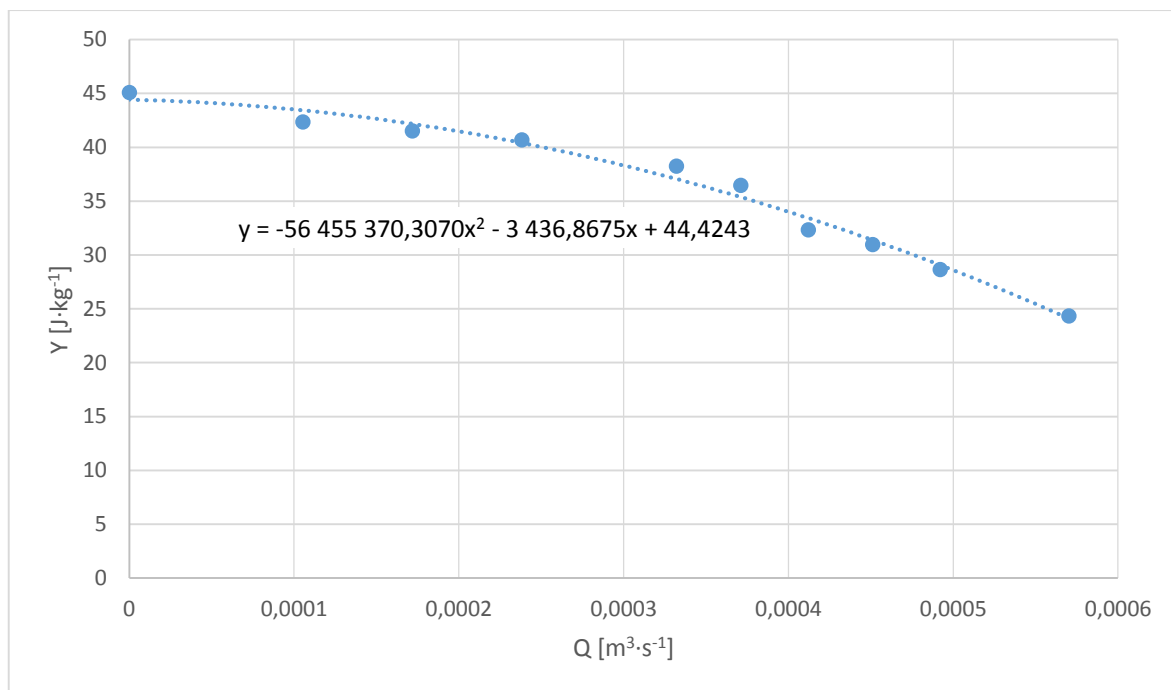
Příklady výpočtů jsou počítány ze zeleně vynačeného řádku. Výsledky měření pro otáčky  $n = 1200 \text{ min}^{-1}$  jsou zobrazeny v tabulce 1:

Číslo měření	Průtok $Q$ [l/s]	Průtok $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	Celková výtlačná výška $H$ [m]	Měrná energie čerpadla $Y$ [J/kg]	Příkon čerpadla $P$ [W]	Účinnost čerpadla $\eta$ [%]	Točivý moment $t$ [Nm]	Hydraulický výkon $P_h$ [W]
1	0,000	0	4,60	45,09	40,80	0,0	0,32	0,00
2	0,105	0,00011	4,32	42,37	46,62	9,55	0,37	4,45
3	0,172	0,00017	4,24	41,55	47,21	15,07	0,38	7,12
4	0,238	0,00024	4,15	40,70	54,98	17,58	0,44	9,66
5	0,332	0,00033	3,90	38,25	63,72	19,86	0,51	12,66
6	0,371	0,00037	3,72	36,49	63,72	21,18	0,51	13,50
7	0,412	0,00041	3,30	32,35	67,41	19,71	0,54	13,29
8	0,451	0,00045	3,16	30,98	67,80	20,55	0,54	13,93
9	0,492	0,00049	2,92	28,66	73,63	19,09	0,59	14,06
10	0,570	0,00057	2,48	24,37	73,24	18,91	0,58	13,85

*Tabulka 1 Hodnoty průtoku a výtlačné výšky pro rychloběžné oběžné kolo při 80% maximálních otáček ( $n = 1200 \text{ min}^{-1}$ )*

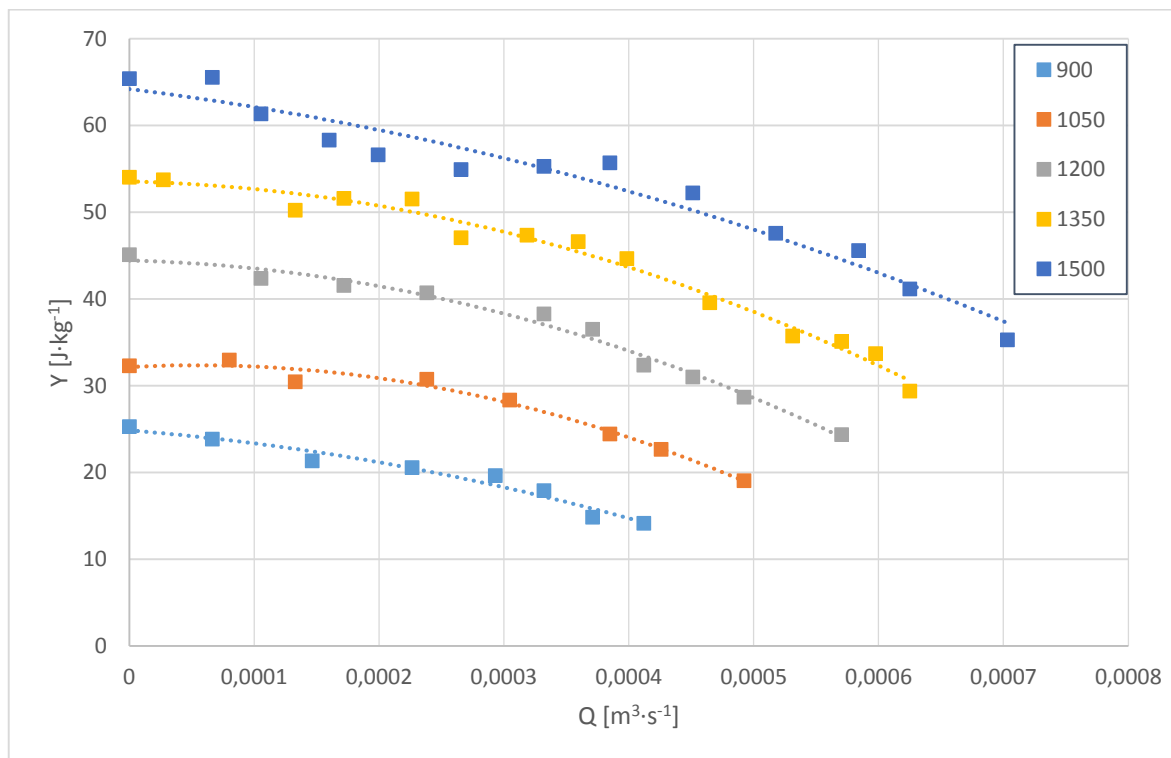
Na následujících grafech uvidíme nejprve samostatně jednu z charakteristik čerpadla. Můžeme si všimnout, že body jsou naměřeny s určitým rozptylem měření, proto jsme pro určení závislosti  $Y - Q$  provedli polynomickou regresi a zjistili rovnici této křivky. Tento postup byl použit při přepočtu parametrů na jiné otáčky a určení provozních bodů čerpadla.





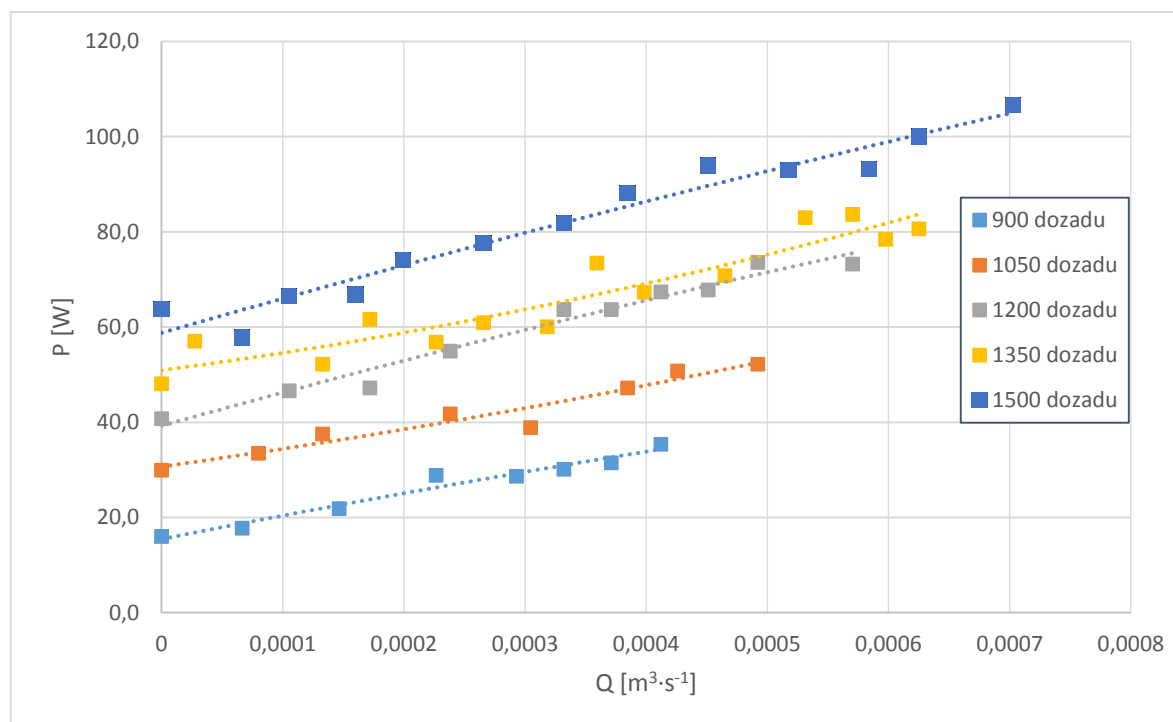
Obrázek 18 Charakteristika oběžného kola s lopatkou zahnutou dozadu na stendu FM50 při 80% maximálních otáček (1200 ot/min)

Na tomto grafu je vidět porovnání čerpadlových charakteristik, což je závislost průtoku  $Q$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] na měrné energii  $Y$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]. Čím větší otáčky, tím je potřeba více měrné energie na stejný průtok.



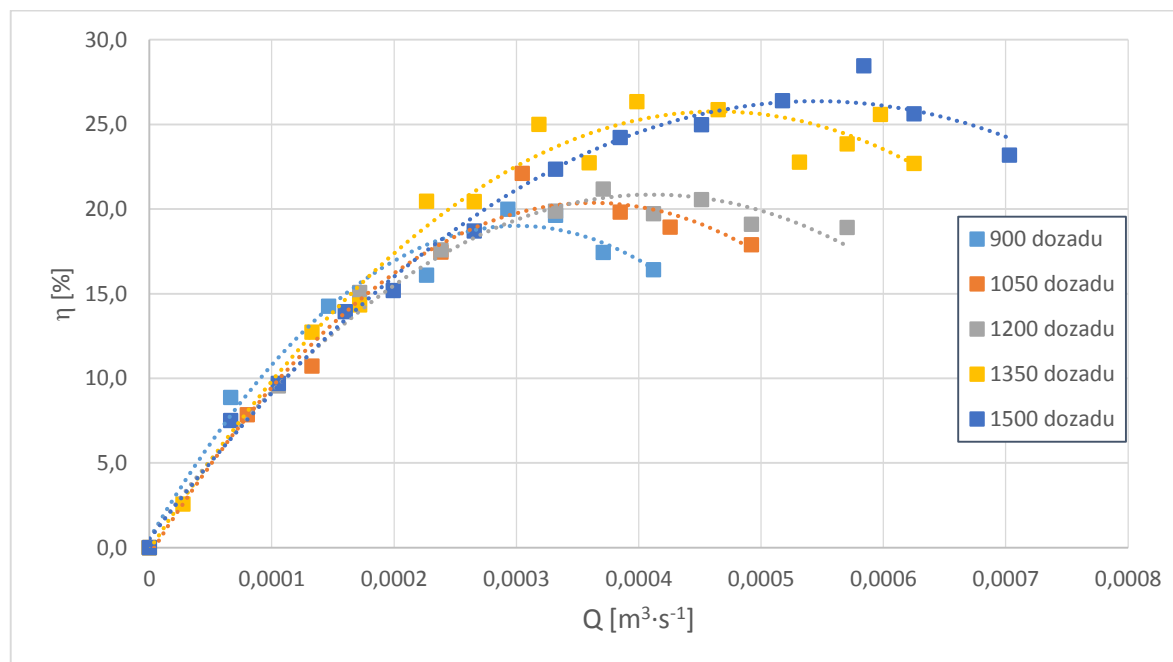
Obrázek 19 Porovnání čerpadlových charakteristik rychloběžného čerpadla zařízení při různých otáčkách u zařízení FM50

Na dalším grafu máme porovnání příkonů  $P$  [W] v závislosti na průtocích  $Q$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] za různých otáček v rozmezí od  $n = 900 \text{ min}^{-1}$  do  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ . Povšimnout si můžeme trendu, že čím jsou větší otáčky  $n$ , tím je větší i příkon  $P$  a s většími průtoky se zvyšuje.



Obrázek 20 Porovnání příkonů rychloběžného oběžného kola za různých otáček u zařízení FM50

Dále tu máme graf porovnání účinností  $\eta$  [%] na rychloběžném oběžném kole v závislosti na průtocích. Můžeme si povšimnout, že maximální účinnost se s většími otáčkami pohybuje směrem k větším průtokům.



Obrázek 21 Porovnání účinností rychloběžného oběžného kola za různých otáček u zařízení FM50

### 2.1.3. Oběžné kolo s lopatkou zahnutou dopředu (pomaluběžné)

#### Příklady výpočtů:

$$P_h = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g = 3,00 \cdot 0,00061 \cdot 997 \cdot 9,81 = 17,95 \text{ W}$$

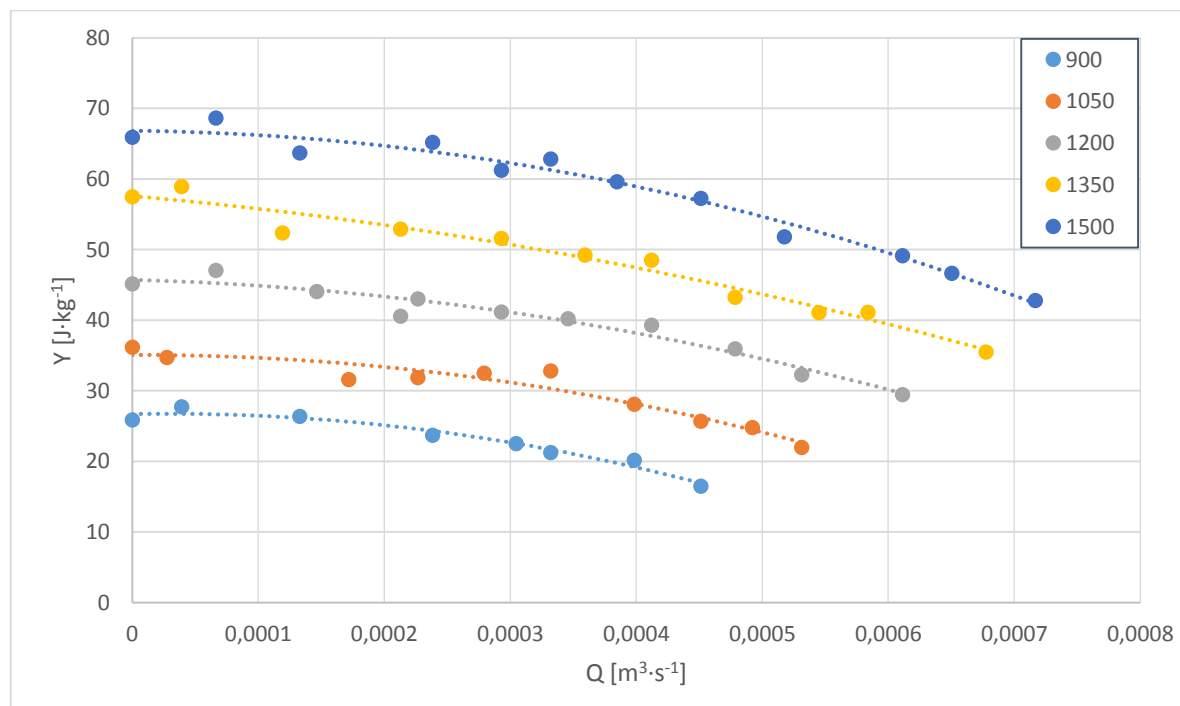
$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1200 \cdot 0,83}{60} = 104,71 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_h}{P} \cdot 100 = \frac{17,95}{104,71} \cdot 100 = 17,15 \%$$

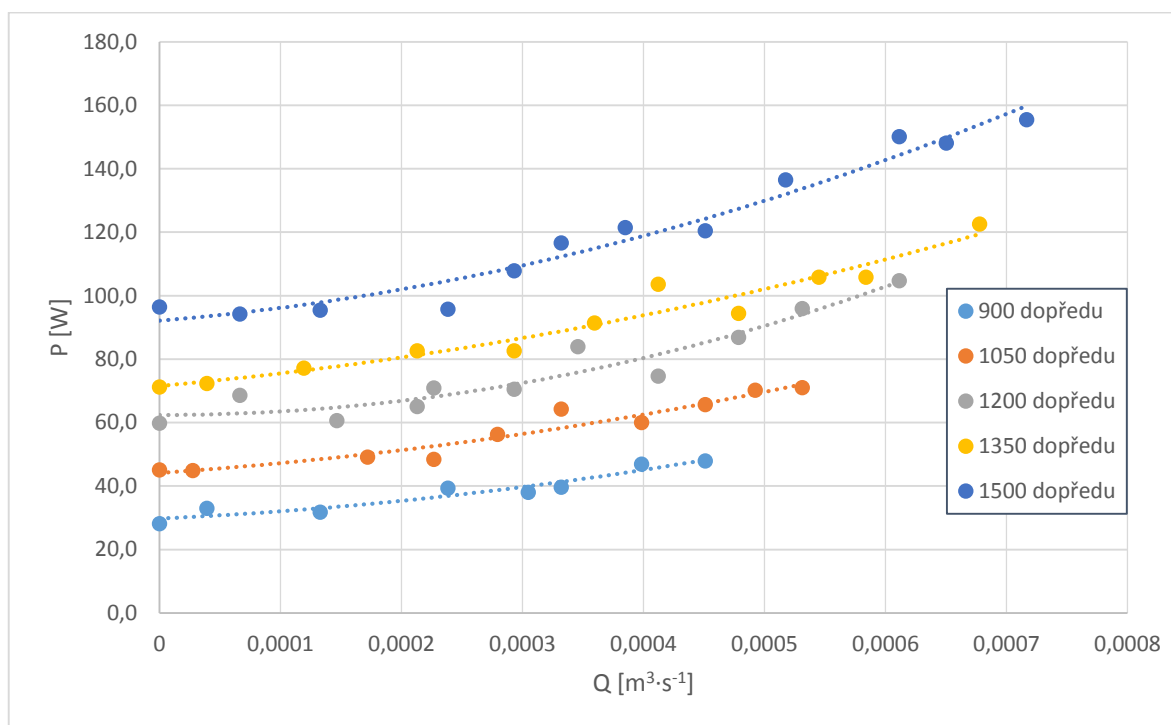
Výsledky měření pro otáčky  $n = 1200 \text{ min}^{-1}$  jsou prezentovány v tabulce 2:

Číslo měření	Průtok $Q$ [l/s]	Průtok $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	Celková výtlačná výška $H$ [m]	Měrná energie čerpadla $Y$ [J/kg]	Příkon čerpadla $P$ [W]	Účinnost čerpadla $\eta$ [%]	Točivý moment $t$ [Nm]	Hydraulický výkon $P_h$ [W]
1	0,00	0	4,60	45,16	59,83	0,00	0,48	0,00
2	0,07	0,00007	4,80	47,07	68,57	4,54	0,55	3,11
3	0,15	0,00015	4,49	44,05	60,61	10,61	0,48	6,43
4	0,21	0,00021	4,14	40,60	65,08	13,24	0,52	8,61
5	0,23	0,00023	4,38	43,02	70,91	13,70	0,56	9,71
6	0,29	0,00029	4,20	41,17	70,52	17,05	0,56	12,02
7	0,35	0,00035	4,10	40,21	83,92	16,51	0,67	13,85
8	0,41	0,00041	4,01	39,29	74,60	21,63	0,59	16,14
9	0,48	0,00048	3,67	35,97	86,84	19,76	0,69	17,15
10	0,53	0,00053	3,29	32,29	95,97	17,81	0,76	17,10
11	0,61	0,00061	3,00	29,47	104,71	17,15	0,83	17,95

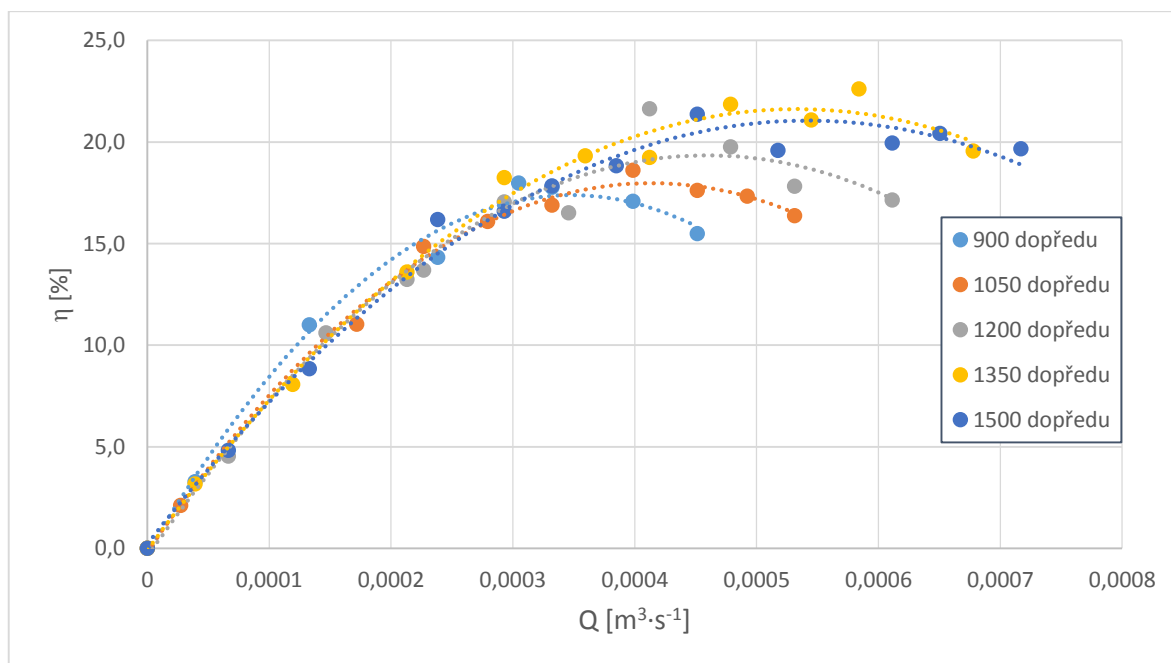
Tabulka 2 Hodnoty průtoku a výtlačné výšky pro pomaluběžné oběžné kolo při 80% maximálních otáček ( $n = 1200 \text{ min}^{-1}$ )



Obrázek 22 Porovnání čerpadlových charakteristik pomaluběžného čerpadla zařízení u FM50 při různých otáčkách



Obrázek 23 Porovnání příkonů pomaluběžného oběžného kola u FM50 za různých otáček



Obrázek 24 Porovnání účinností pomaluběžného oběžného kola u FM50 za různých otáček

Z porovnání výsledků měření je patrné, že kolo s lopatkou zahnutou dopředu dosahuje vyšší měrné energie (do cca 10 %), ale je požadován výrazně vyšší příkon a v důsledku toho klesá celková účinnost (Obrázek 31, 33, 35).

## 2.2. Zařízení Armfield FM51

U tohoto zařízení se musí vhodně nastavit třicestný ventil, aby druhé čerpadlo nebylo v aktivním oběhu, tudíž aby voda procházela jen prvním čerpadlem.

### 2.2.1. Postup měření

Počítač připojíme k řídicí jednotce daného hydraulického obvodu a utáhneme škrticí ventil na výtlaku. Potom postupně povolujeme škrticí ventil a pomocí počítače měříme jednotlivé body průtoku daným utáhnutím škrticího ventilu. Podobně jako u zařízení *Armfield FM50* postupně měříme pro 60, 70, 80 a 90 % výkonu, což odpovídá 1080, 1260, 1440 a 1620 min<sup>-1</sup>, protože maximální otáčky čerpadla tohoto stendu jsou odlišné a dosahují hodnoty  $n = 1800 \text{ min}^{-1}$ .

### 2.2.2. Oběžné kolo s lopatkou zahnutou dozadu (rychlloběžné)

#### Příklady výpočtů:

$$P_h = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g = 5,16 \cdot 0,00077 \cdot 997 \cdot 9,81 = 39,04 \text{ W}$$

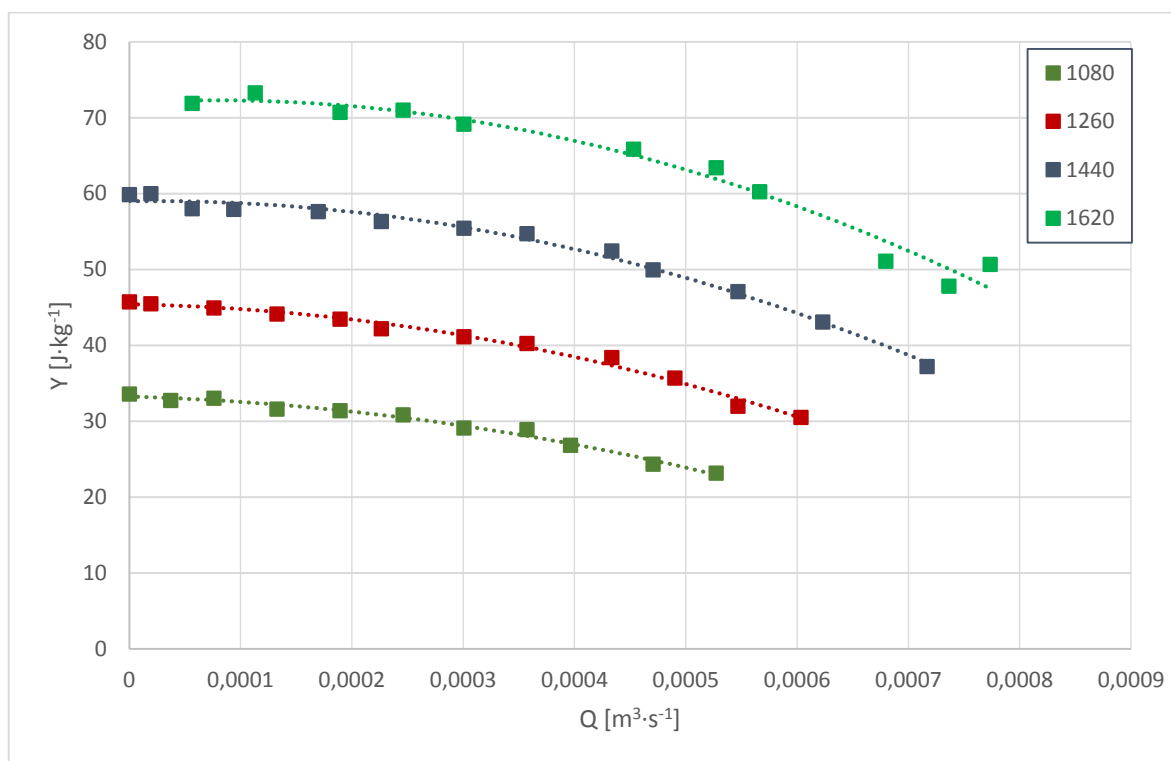
$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1620 \cdot 1,12}{60} = 190,66 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_h}{P} \cdot 100 = \frac{39,04}{190,66} \cdot 100 = 20,47 \%$$

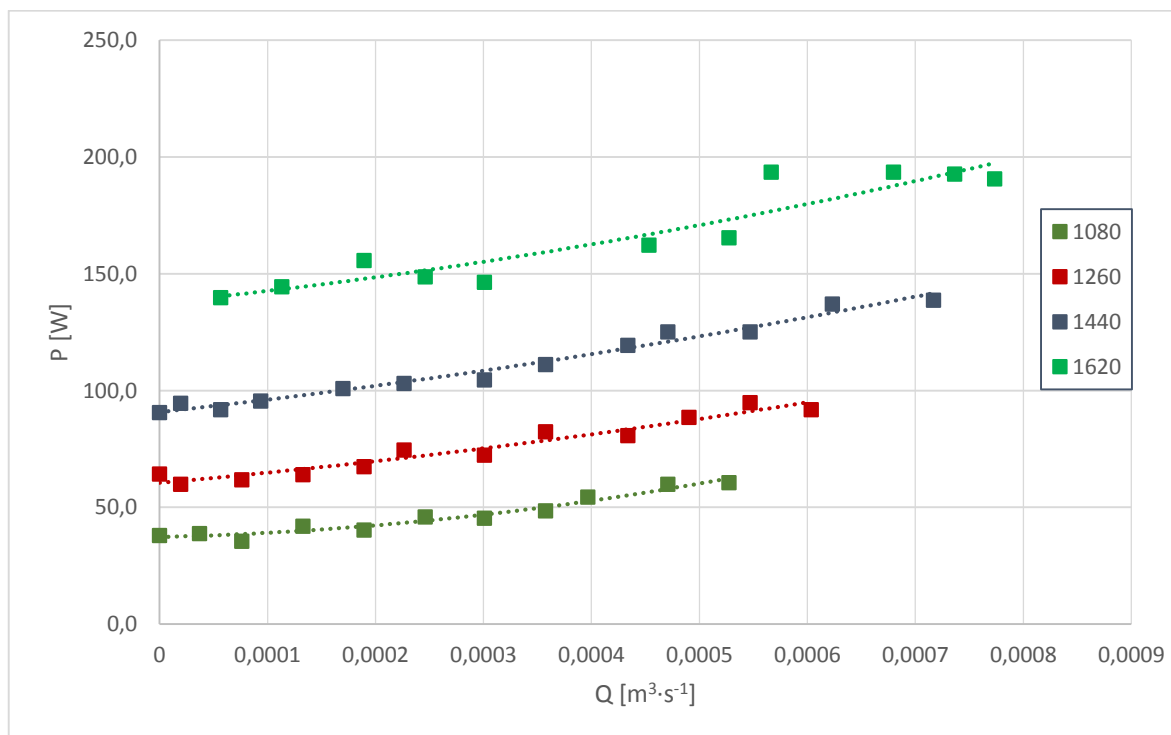
Výsledky měření pro otáčky  $n = 1620 \text{ min}^{-1}$  jsou prezentovány v tabulce 3:

Číslo měření	Průtok Q [l/s]	Průtok Q [m³/s]	Celková výtlačná výška H [m]	Měrná energie čerpadla Y [J/kg]	Příkon čerpadla P [W]	Účinnost čerpadla η [%]	Točivý moment t [Nm]	Hydraulický výkon P <sub>h</sub> [W]
1	0,773	0,00077	5,16	50,65	190,66	20,47	1,12	39,04
2	0,736	0,00074	4,87	47,78	192,76	18,19	1,14	35,06
3	0,680	0,00068	5,21	51,10	193,54	17,88	1,14	34,61
4	0,566	0,00057	6,14	60,24	193,54	17,57	1,14	34,00
5	0,527	0,00053	6,47	63,42	165,48	20,14	0,98	33,33
6	0,453	0,00045	6,71	65,85	162,34	18,32	0,96	29,74
7	0,301	0,00030	7,05	69,14	146,34	14,16	0,86	20,72
8	0,246	0,00025	7,24	71,02	148,70	11,71	0,88	17,42
9	0,189	0,00019	7,21	70,69	155,78	8,57	0,92	13,35
10	0,113	0,00011	7,47	73,29	144,50	5,73	0,85	8,27
11	0,057	0,00006	7,33	71,87	139,78	2,90	0,82	4,06

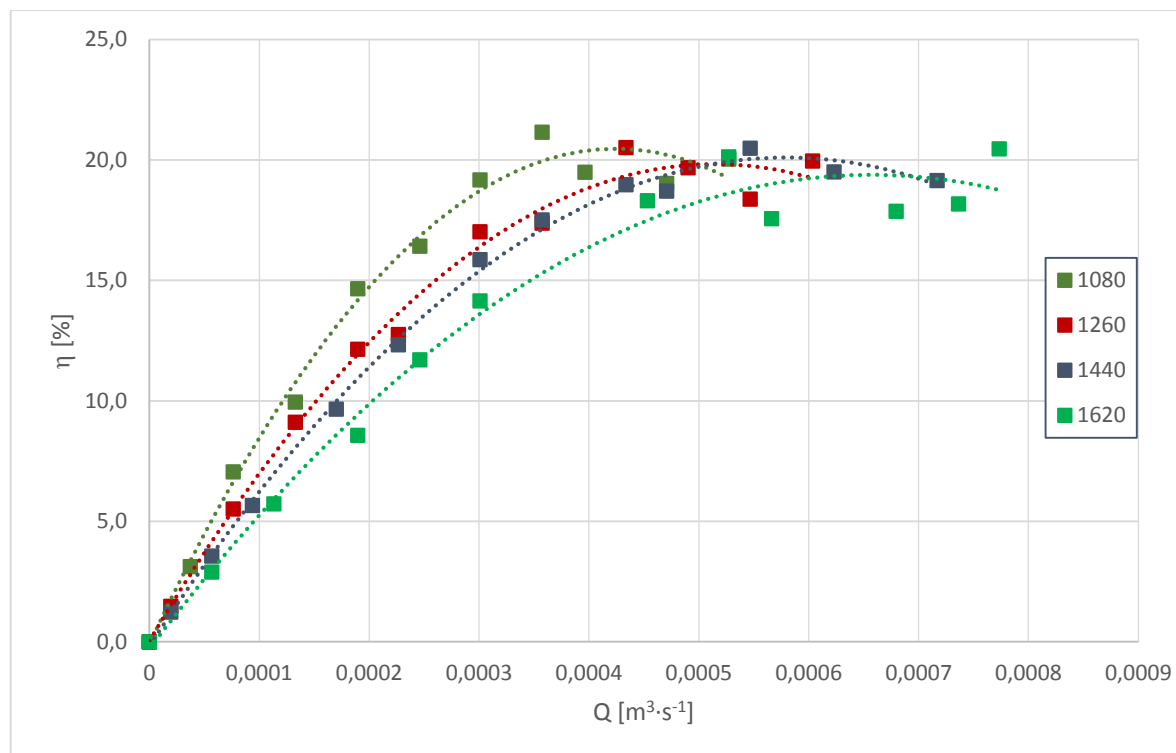
*Tabulka 3 Hodnoty průtoku a výtlačné výšky pro rychloběžné oběžné kolo při 90% maximálních otáček ( $n = 1620 \text{ min}^{-1}$ )*



Obrázek 25 Porovnání čerpadlových charakteristik rychloběžného oběžného kola při různých otáčkách u zařízení FM51



Obrázek 26 Porovnání příkonů rychloběžného oběžného kola při různých otáčkách u zařízení FM51



Obrázek 27 Porovnání účinností rychloběžného oběžného kola při různých otáčkách u zařízení FM51

Ve srovnání se stendem *Armfield FM50* je dosahovaná maximální účinnost kola s lopatkou zahnutou dozadu nižší a při práci pro měřené otáčky je poměrně vyrovnaná. Na stendu *Armfield FM50* je maximální účinnost 26 % a odpovídá otáčkám  $n = 1350 \text{ min}^{-1}$ , zatímco na stendu *Armfield FM51* se maximum pohybuje kolem 21 % a snižuje se s klesajícími otáčkami.

### 2.2.3. Oběžné kolo s lopatkou zahnutou dopředu (pomaluběžné)

#### Příklady výpočtů:

$$P_h = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g = 4,82 \cdot 0,00077 \cdot 997 \cdot 9,81 = 36,50 \text{ W}$$

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1620 \cdot 1,84}{60} = 312,35 \text{ W}$$

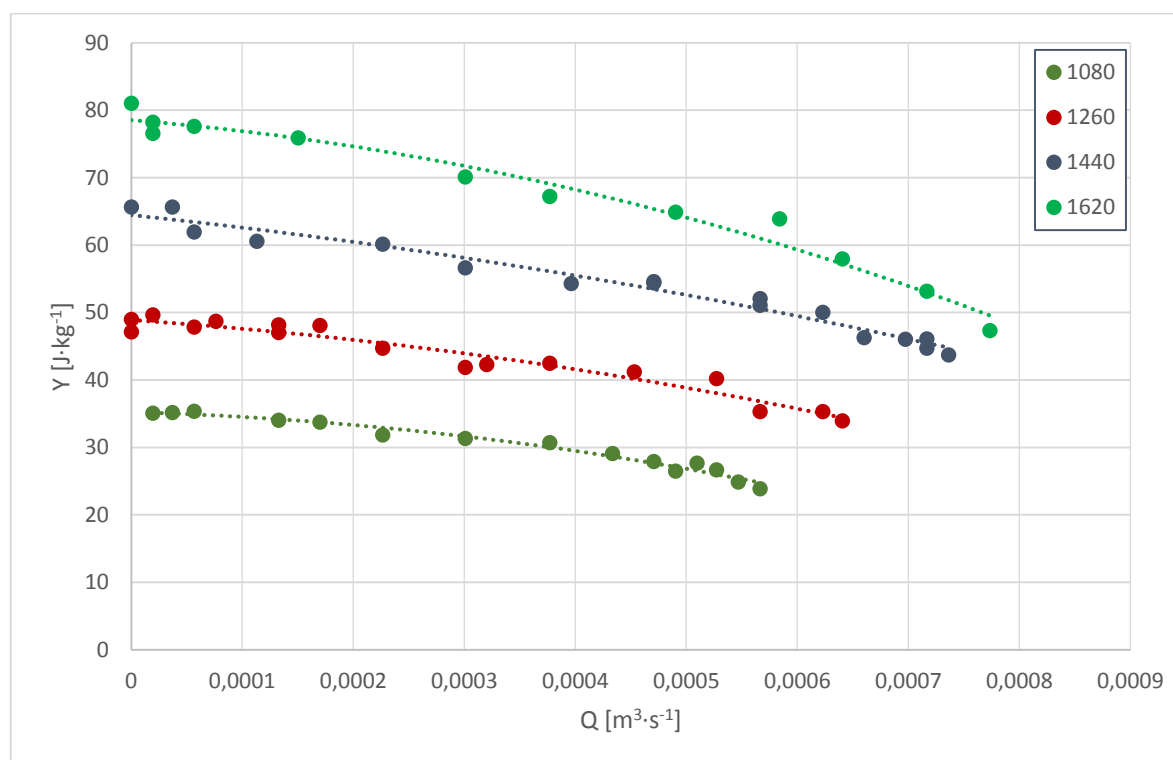
$$\eta = \frac{P_h}{P} \cdot 100 = \frac{36,50}{312,35} \cdot 100 = 11,69 \%$$

Výsledky měření pro otáčky  $n = 1620 \text{ min}^{-1}$  jsou prezentovány v tabulce 4:

Porovnání charakteristik čerpadla měřených na stendech Armfield FM50 a Armfield FM51

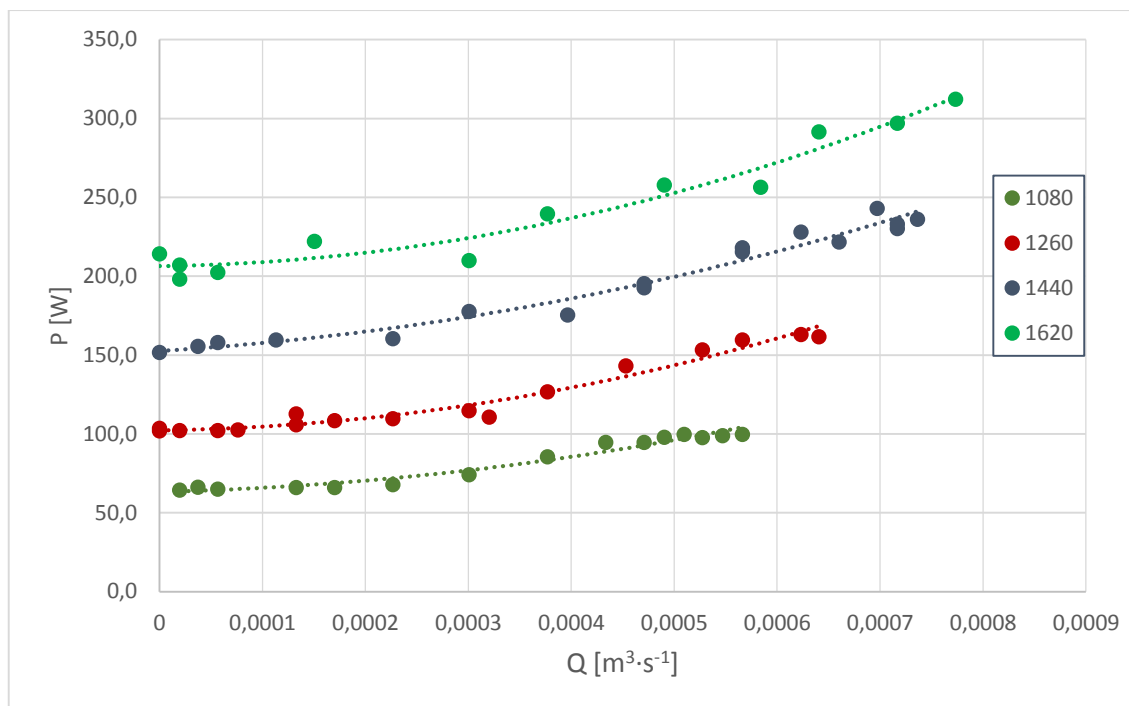
Číslo měření	Průtok $Q$ [l/s]	Průtok $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	Celková výtlačná výška $H$ [m]	Měrná energie čerpadla $Y$ [J/kg]	Příkon čerpadla $P$ [W]	Účinnost čerpadla $\eta$ [%]	Točivý moment $t$ [Nm]	Hydraulický výkon $P_h$ [W]
1	0,773	0,00077	4,82	47,33	312,35	11,69	1,84	36,50
2	0,717	0,00072	5,42	53,15	297,14	12,79	1,75	37,99
3	0,641	0,00064	5,91	57,95	291,63	12,69	1,72	37,02
4	0,584	0,00058	6,51	63,89	256,49	14,51	1,51	37,20
5	0,490	0,00049	6,61	64,88	257,80	12,30	1,52	31,72
6	0,377	0,00038	6,85	67,18	239,70	10,53	1,41	25,25
7	0,301	0,00030	7,14	70,08	210,07	10,01	1,24	21,02
8	0,150	0,00015	7,74	75,88	222,13	5,12	1,31	11,38
9	0,057	0,00006	7,91	77,59	202,46	2,16	1,19	4,38
10	0,020	0,00002	7,97	78,23	198,27	0,77	1,17	1,52
11	0,020	0,00002	7,80	76,53	207,18	0,72	1,22	1,49
12	0,000	0	8,26	81,01	214,26	0	1,26	0

Tabulka 4 Hodnoty průtoku a výtlačné výšky pro pomaluběžné oběžné kolo při 90% maximálních otáček ( $n = 1620 \text{ min}^{-1}$ )

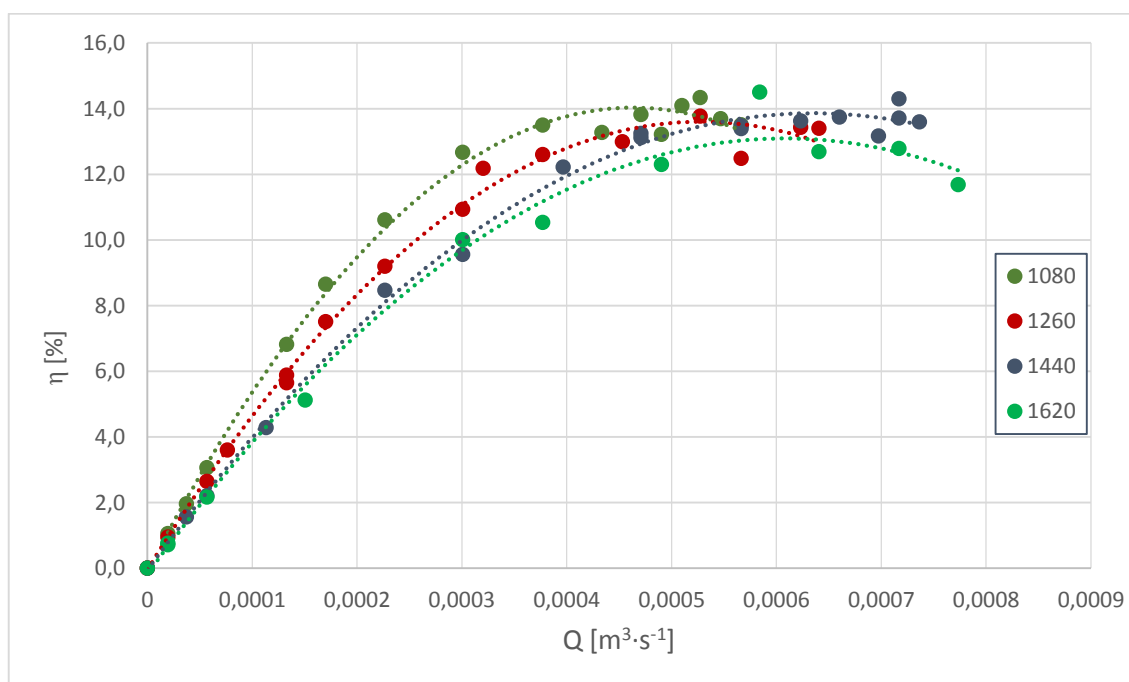


Obrázek 28 Porovnání čerpadlových charakteristik pomaluběžného oběžného kola při různých otáčkách u zařízení FM51





Obrázek 29 Porovnání příkonů pomaluběžného oběžného kola při různých otáčkách u zařízení FM51



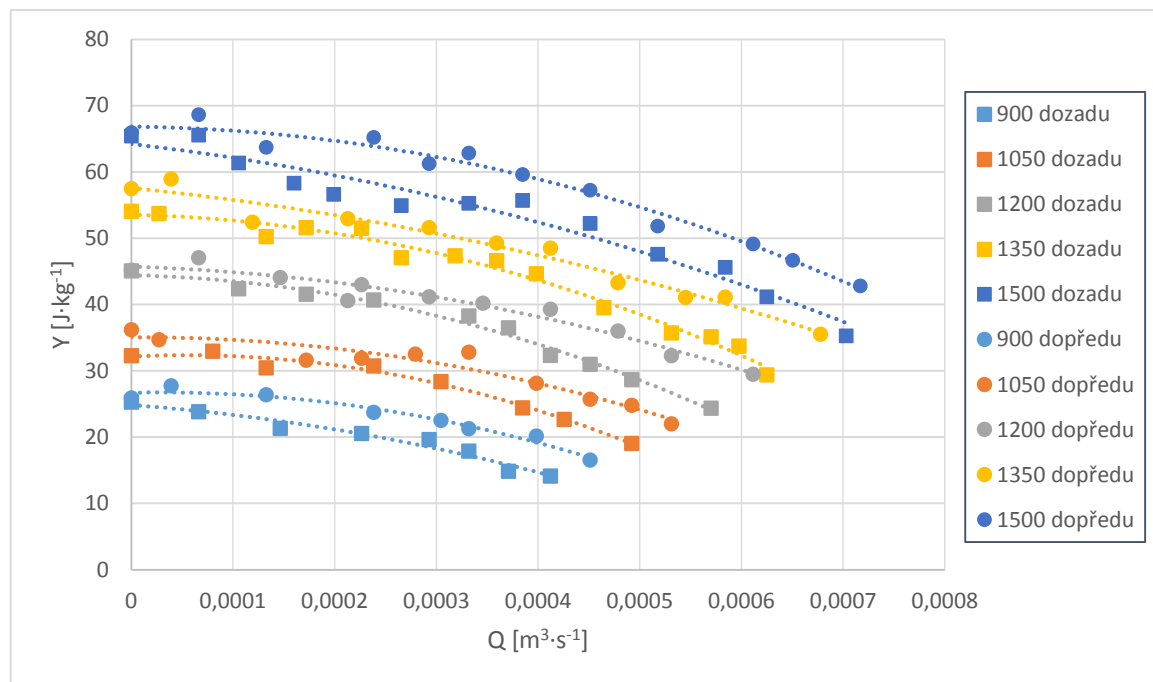
Obrázek 30 Porovnání účinností pomaluběžného oběžného kola při různých otáčkách u zařízení FM51

Z porovnání výsledků měření je patrné, že kolo s lopatkou zahnutou dopředu dosahuje opět vyšší měrné energie (do cca 10 %), ale je požadován výrazně vyšší příkon a v důsledku toho klesá celková účinnost (viz Obrázek 36, 38, 39). Podrobné porovnání je prezentováno v následující kapitole 3.

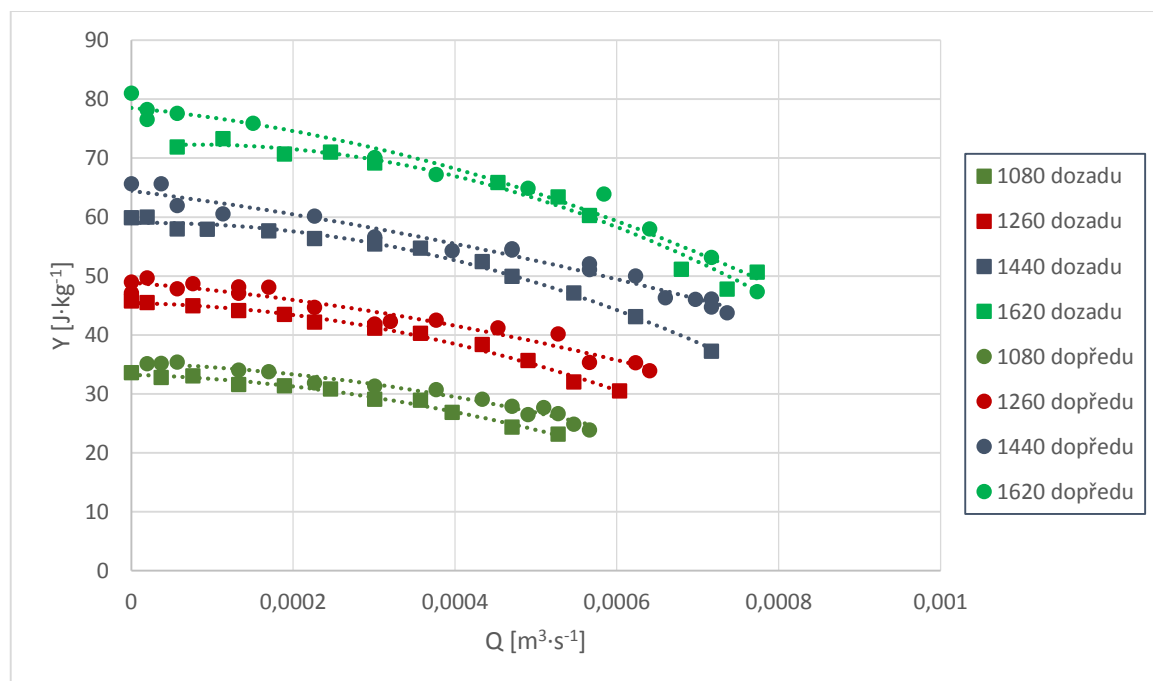
### 3. Grafické porovnání stendů Armfield FM50 a Armfield FM51

Porovnání je provedeno pro stejné procento výkonu obou čerpadel (90, 80, 70 a 60 %), kterým však odpovídají odlišné otáčky. U stendu *Armfield FM50* byly navíc měřeny parametry při 100 % výkonu (tj.  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ ), zatímco u stendu *Armfield FM51* odpovídají maximální otáčky hodnotě  $n = 1800 \text{ min}^{-1}$ , avšak nebyly měřeny.

#### 3.1. Porovnání čerpadlových charakteristik obou oběžných kol

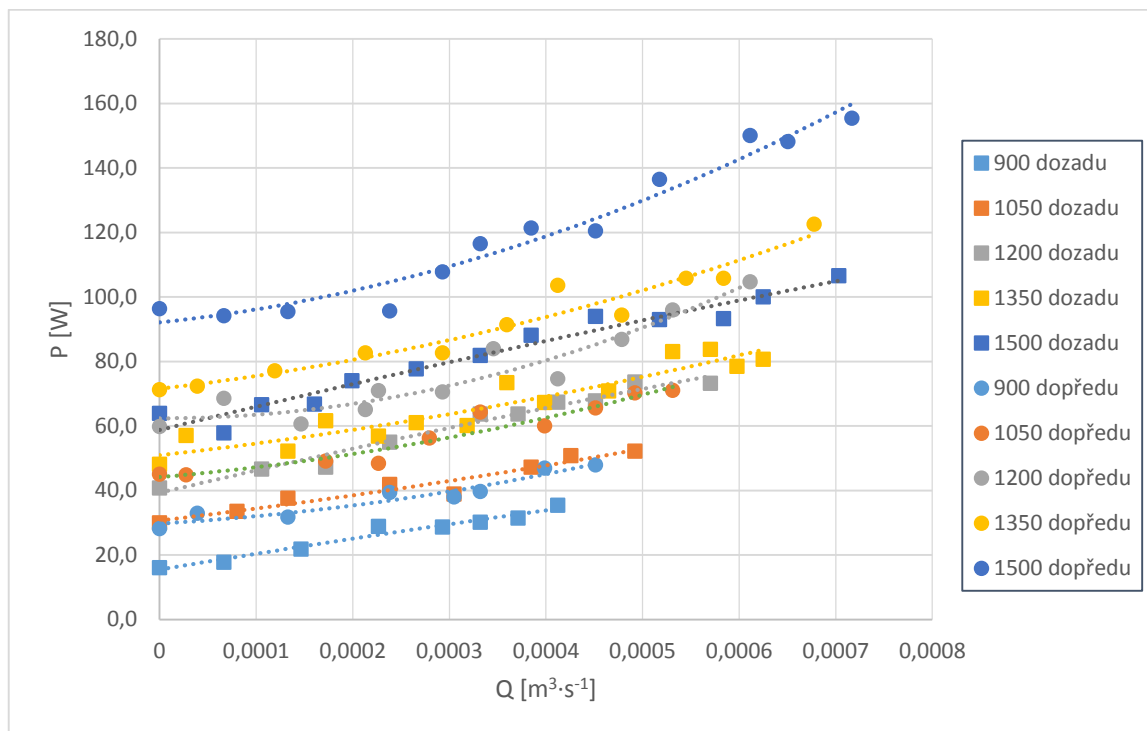


Obrázek 31 Porovnání charakteristik obou oběžných kol na stendu FM50

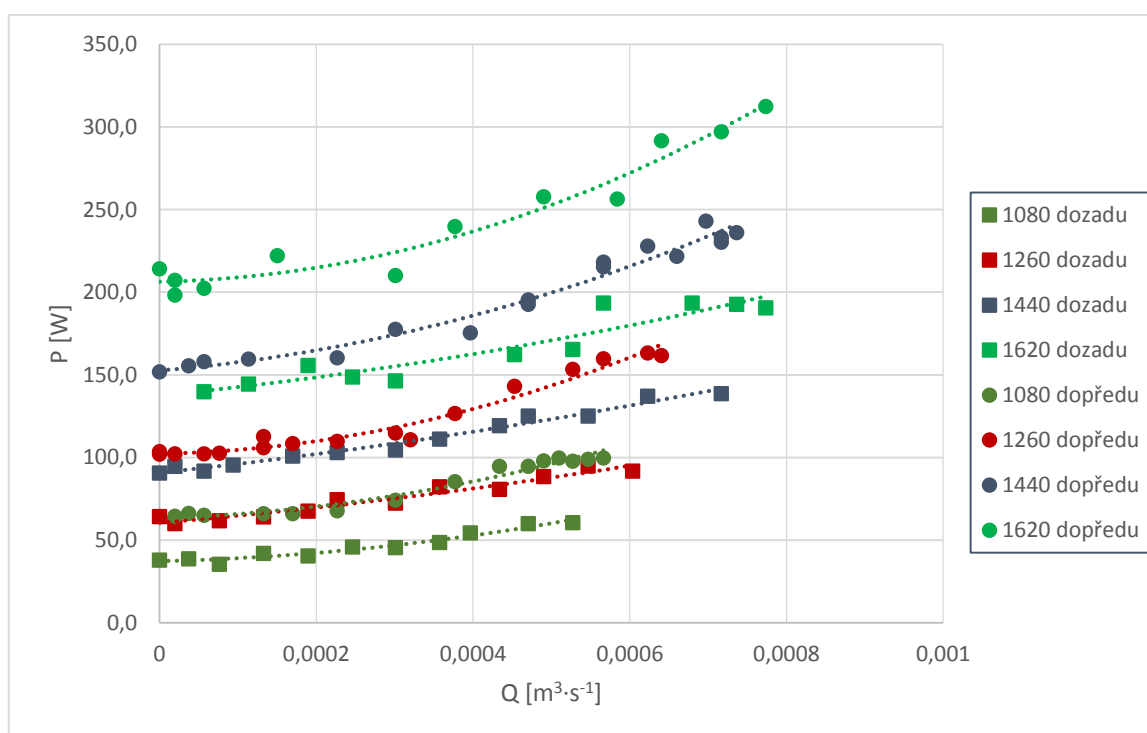


Obrázek 32 Porovnání charakteristik obou oběžných kol na stendu FM51

### 3.2. Porovnání příkonů obou oběžných kol

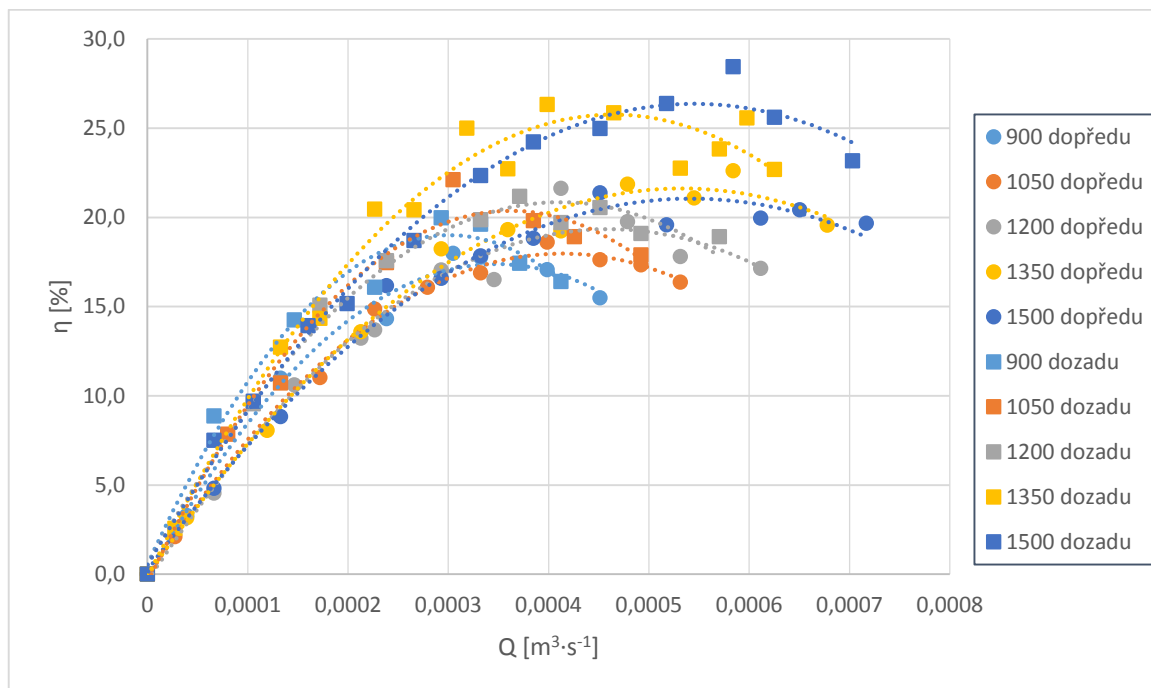


Obrázek 33 Porovnání příkonů rychloběžného a pomaluběžného oběžného kola na stendu FM50

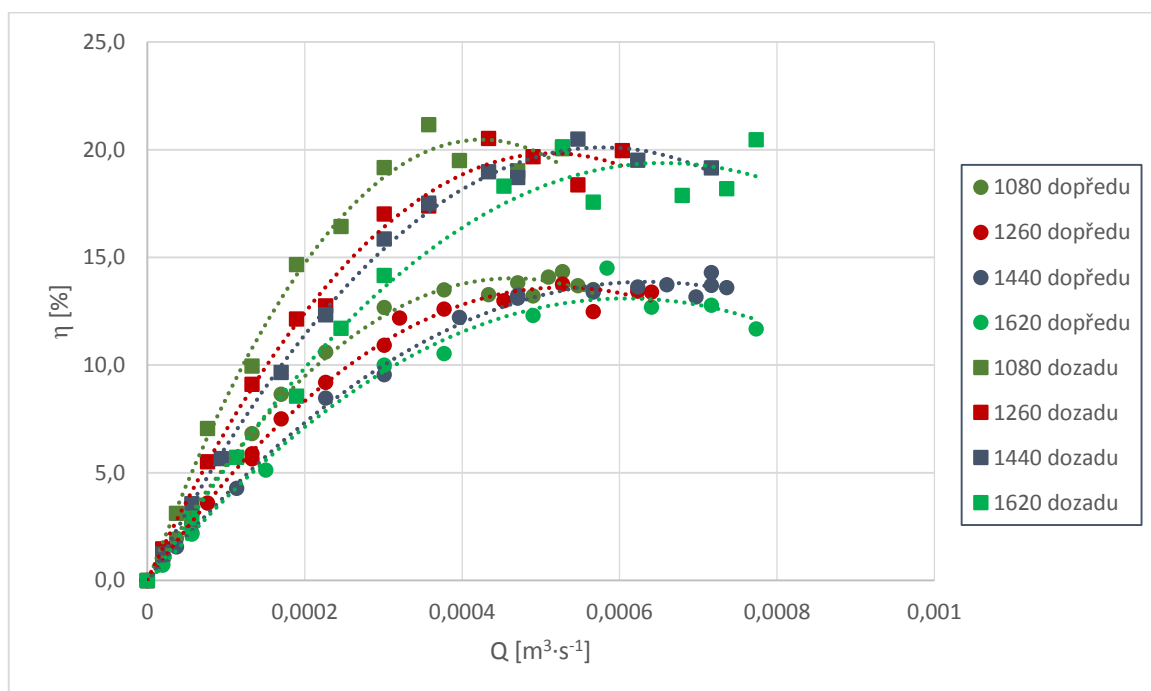


Obrázek 34 Porovnání příkonů rychloběžného a pomaluběžného oběžného kola na stendu FM51

### 3.3. Porovnání účinností obou oběžných kol



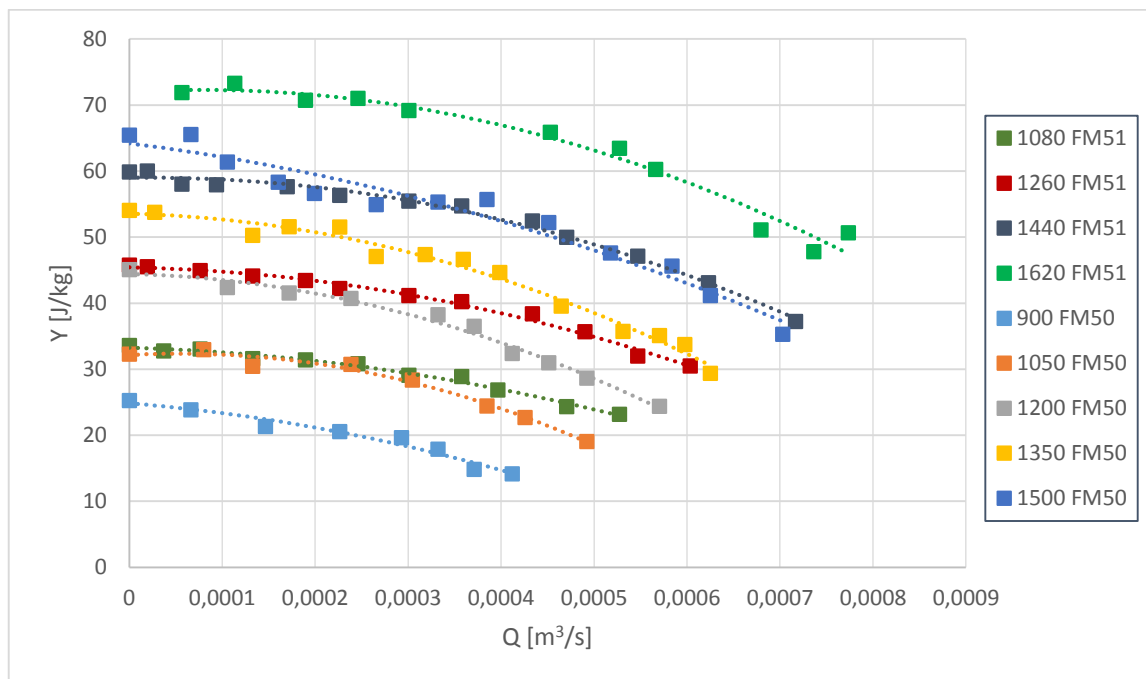
Obrázek 355 Porovnání účinností rychloběžného a pomaluběžného oběžného kola na stendu FM50



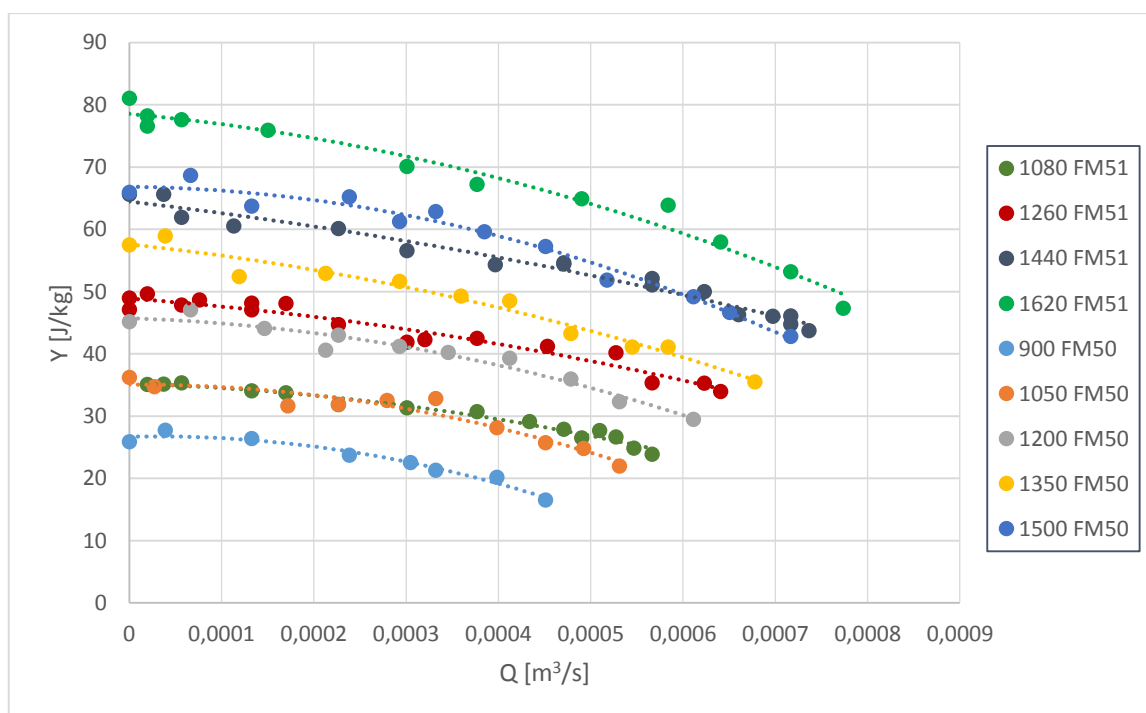
Obrázek 366 Porovnání účinností rychloběžného a pomaluběžného oběžného kola na stendu FM51

Ačkoli se u obou stendů jedná o čerpadlo stejného typu, pracuje s odlišnými parametry. Vzhledem k vyšším otáčkám stendu *Armfield FM51* je dosahována vyšší měrná energie. Příkon v závěrném bodě při 80 % výkonu je u stendu *Armfield FM51* téměř 2,5 krát vyšší než u stendu *Armfield FM50*. Dosahovaná účinnost klesá téměř o třetinu.

### 3.4. Porovnání čerpadlových charakteristik na obou stendech



*Obrázek 377 Porovnání charakteristik rychloběžného oběžného kola pro různé otáčky na obou stendech*



*Obrázek 388 Porovnání charakteristik pomaluběžného oběžného kola pro různé otáčky na obou stendech*

### 3.5. Afinní vztahy

Pro porovnání charakteristik čerpadla na obou stendech při stejných otáčkách jsem provedl přepoččet parametrů při otáčkách  $n = 1260 \text{ min}^{-1}$  ze zařízení *Armfield FM51* na hodnoty otáček  $n = 1200 \text{ min}^{-1}$ . Cílem tohoto pokusu bylo zjistit, zda jsou data kompatibilní vůči sobě a zdánlivě alespoň podobná. Průtok se afinními vztahy přepočítal pomocí vzorce:

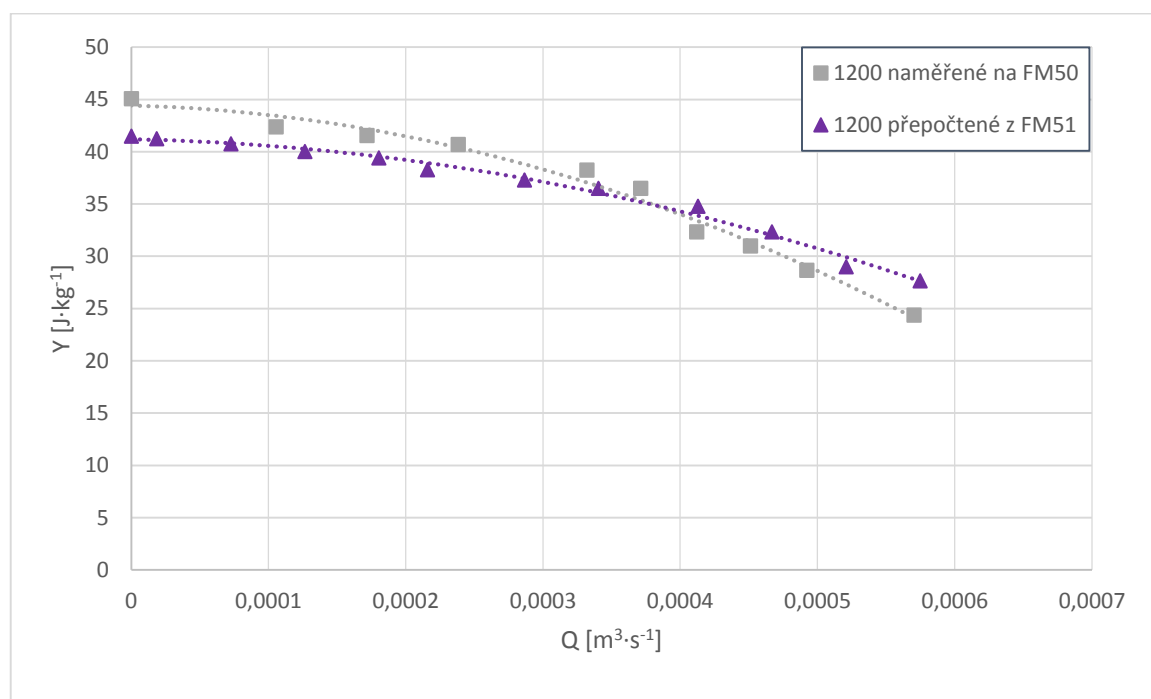
$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

kde  $Q_2$  je průtok při otáčkách  $n_2 = 1200 \text{ min}^{-1}$  vypočtený z původního průtoku  $Q_1$  při otáčkách  $n_1 = 1260 \text{ min}^{-1}$ .

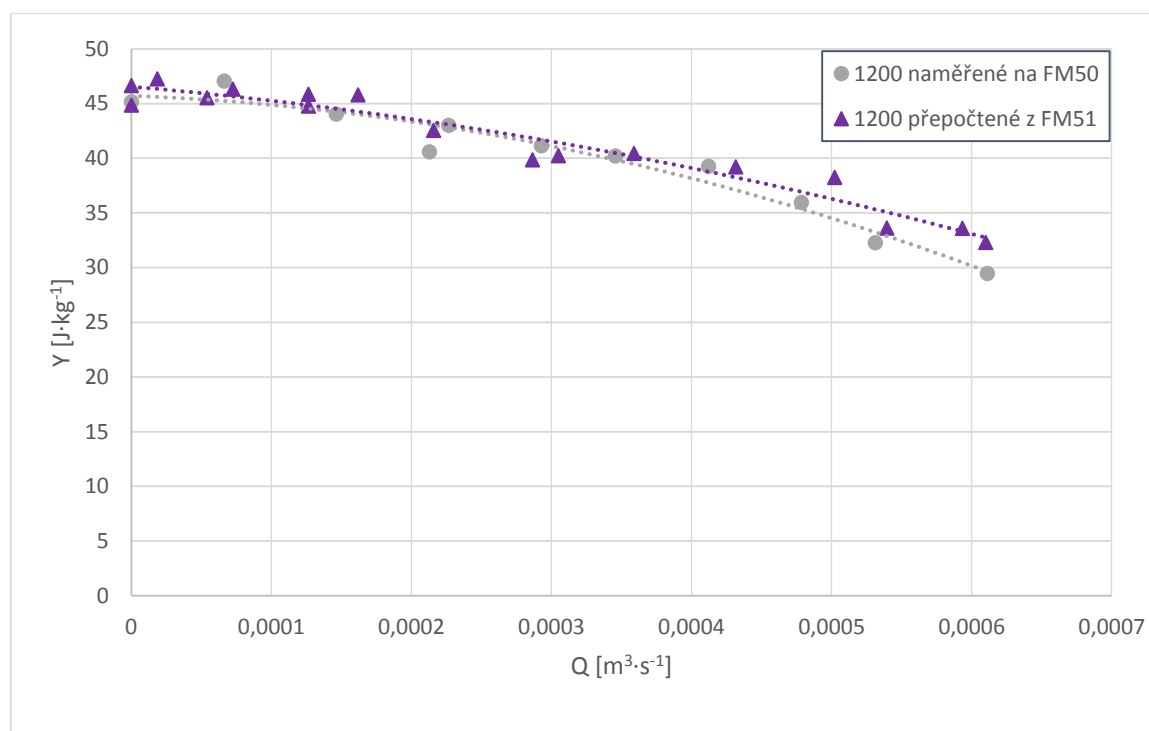
Podobně se přepočítává i měrná energie:

$$Y_2 = Y_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

kde  $Y_2$  je měrná energie při otáčkách  $n_2 = 1200 \text{ min}^{-1}$  vypočtený z původní měrné energie  $Y_1$  při otáčkách  $n_1 = 1260 \text{ min}^{-1}$ . Průběhy charakteristik získaných na obou stendech při otáčkách  $n = 1200$  jsou porovnány v následujícím grafu:



Obrázek 39 Porovnání čerpadlových charakteristik naměřených a přepočtených z afinních vztahů - rychloběžné kolo



Obrázek 40 Porovnání čerpadlových charakteristik naměřených a přepočtených z afinních vztahů - pomaluběžné kolo

Z porovnání obou křivek můžeme usoudit, že křivka naměřená na zařízení *Armfield FM50* je strmější než druhá křivka, ale jsou si podobné a porovnatelné se zanedbatelnou maximální chybou asi 5 – 10 %.

#### 4. Charakteristika potrubí a určení provozních bodů

Charakteristika potrubí je potřeba pro zjištění provozního bodu čerpadla. Průsečík charakteristiky potrubí s charakteristikou čerpadla je provozní bod, ve kterém čerpadlo pracuje.

Vnitřní průměry a rozsah rychlosti jsem určil z výsledků měření. Pro výpočet součinitele tření sacího i výtlačného potrubí jsem použil vztah podle Blasia pro hydraulicky hladké potrubí vzhledem k hodnotám Reynoldsova čísla:

$$\lambda_{s,v} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_{s,v}}}$$

Pro sací a výtlačné potrubí jsem zohlednil ve výpočtu tvarovky a armatury osazené na potrubí. Bylo předpokládáno částečné uzavření ventilu na výtlaku. Po uvážení všech kolen a ventilů na potrubních tratích se počítalo se součinitelem tření  $\zeta_s = 5$  a  $\zeta_v = 10$  pro stend *Armfield FM50* a  $\zeta_s = 15$  a  $\zeta_v = 35$  pro stend *Armfield FM51*.

Statická měrná energie zahrnuje výškový rozdíl mezi zaústěním sání a výtlaku čerpadla a je velmi nízká.

$$Y_{stat} = h \cdot g = 0,07 \cdot 9,81 = 0,6867 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Příklad výpočtu měrné ztráty  $Y_z$ :

$$Y_z = Y_{zs} + Y_{zv} + Y_{stat} = \left( \lambda_s \cdot \frac{l_s}{d_s} + \sum \zeta_s \right) \cdot \frac{v_s^2}{2} + \left( \lambda_v \cdot \frac{l_v}{d_v} + \sum \zeta_v \right) \cdot \frac{v_v^2}{2} + h \cdot g$$

$$= \left( 0,02114 \cdot \frac{0,747}{0,0235} + 5 \right) \cdot \frac{1,8444^2}{2} + \left( 0,01964 \cdot \frac{0,525}{0,0175} + 15 \right) \cdot \frac{3,3260^2}{2} + 0,07 \cdot 9,81 = 9,65 + 58,57 + 0,6867 = 68,91$$

$h$  je výškový rozdíl sání a výtlačku, který je roven pro oba stendy  $h = 0,07$  m.

$Y_{zs}$  je měrná ztráta na sání,

$Y_{zv}$  je měrná ztráta na výtlačku,

$v_s$  je rychlost na sání,

$v_v$  je rychlost na výtlačku,

$d_s$  je průměr sacího potrubí,

$d_v$  je průměr výtlačného potrubí,

$l_s$  je délka sacího potrubí,

$l_v$  je délka výtlačného potrubí,

Délky a průměry potrubí byly předem na stendech změřeny.

Příklad výpočtu je uveden v tabulce 5:

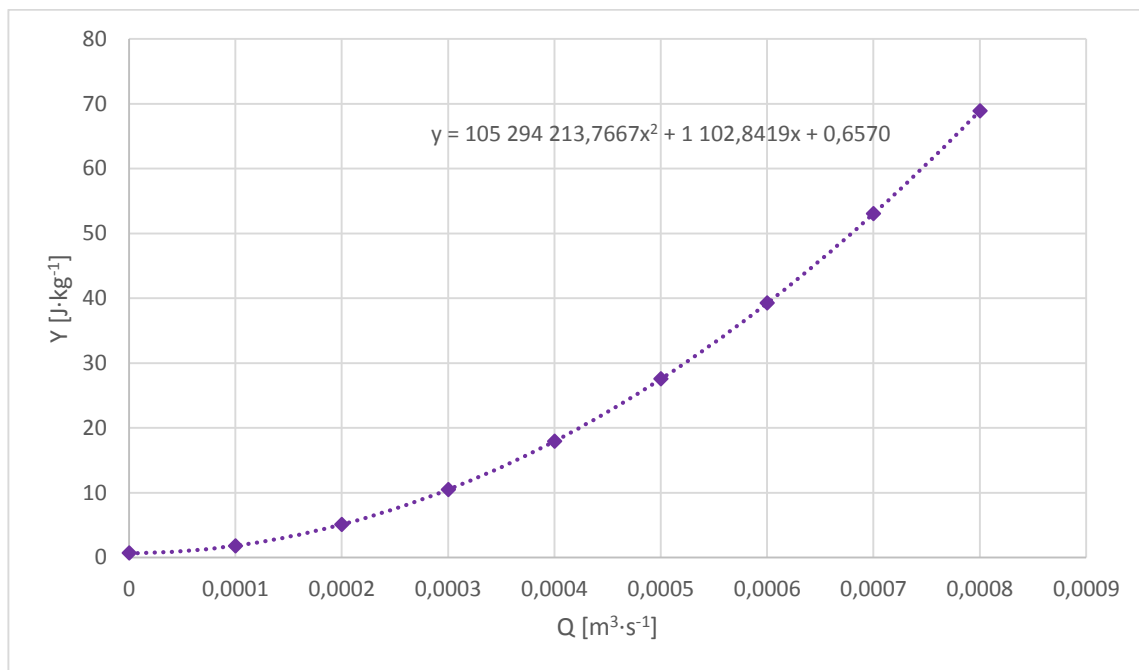
$v_s$	$v_v$	$Q$	$Re_s$	$Re_v$	$\lambda_s$	$\lambda_v$	$Y_{zs}$	$Y_{zv}$	$Y_z$
$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	-	-	-	-	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
0	0	0	0	0	-	-	0	0	0,69
0,2306	0,4158	0,0001	6268,61	8417,85	0,03556	0,03303	0,16	0,95	1,80
0,4611	0,8315	0,0002	12537,22	16835,69	0,02990	0,02778	0,63	3,75	5,06
0,6917	1,2473	0,0003	18805,83	25253,54	0,02702	0,02510	1,40	8,36	10,45
0,9222	1,6630	0,0004	25074,44	33671,39	0,02514	0,02336	2,47	14,80	17,95
1,1528	2,0788	0,0005	31343,05	42089,23	0,02378	0,02209	3,82	23,04	27,55
1,3833	2,4945	0,0006	37611,66	50507,08	0,02272	0,02111	5,48	33,08	39,24
1,6139	2,9103	0,0007	43880,27	58924,93	0,02186	0,02031	7,42	44,93	53,03
1,8444	3,3260	0,0008	50148,88	67342,78	0,02114	0,01964	9,65	58,57	68,91

Tabulka 5 Hodnoty pro výpočet měrné ztráty  $Y_z$

Výslednou závislost  $Y = f(Q_v)$  jsem vynesl do grafu a pomocí programu *Excel* jsem provozní body určil pro 3 vybrané otáčky u obou stendů.



#### 4.1. Potrubí zařízení Armfield FM50



Obrázek 41 Charakteristika potrubí zařízení Armfield FM50

U potrubí *Armfield FM50* jsem určil provozní body skrze průtoky a měrné energie. Průtoky jsem zjistil pomocí řešitele v programu *Excel* a měrné energie jsem určil dosazením průtoky do rovnice potrubí vyznačené v grafu výše. Provozní body pro 3 zvolené otáčky jsou znázorněny v následující tabulce, kde:

$Q_1$  je průtok u rychloběžného kola,

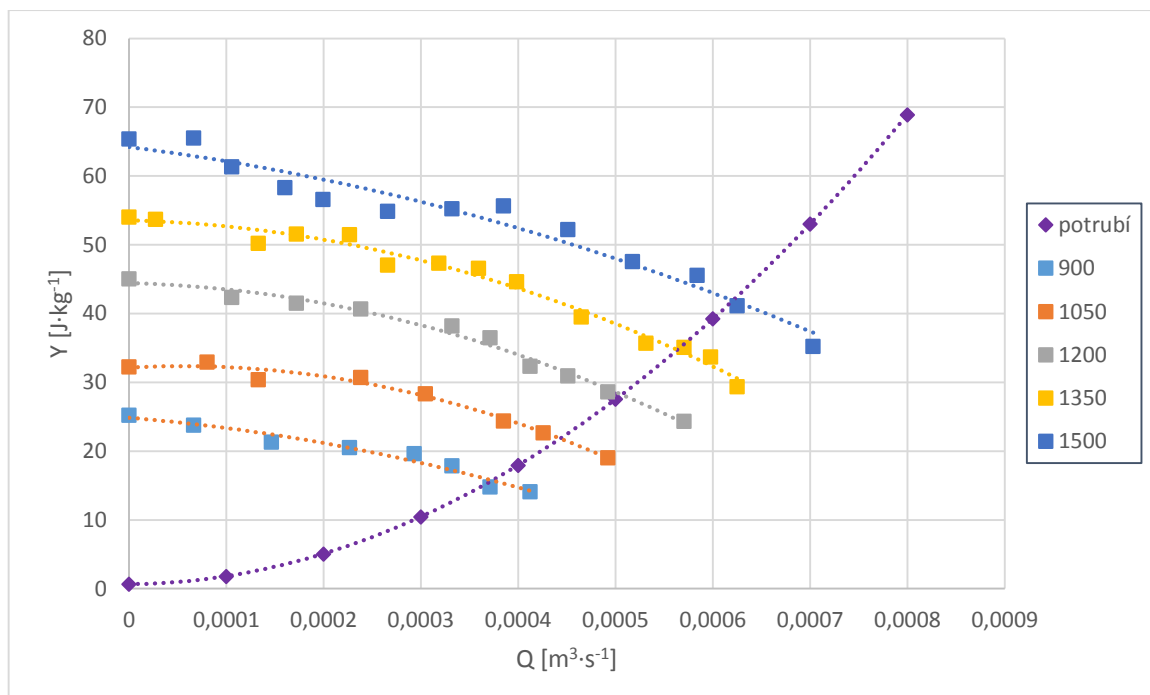
$Q_2$  je průtok u pomaluběžného kola,

$Y_1$  je měrná energie u rychloběžného kola a

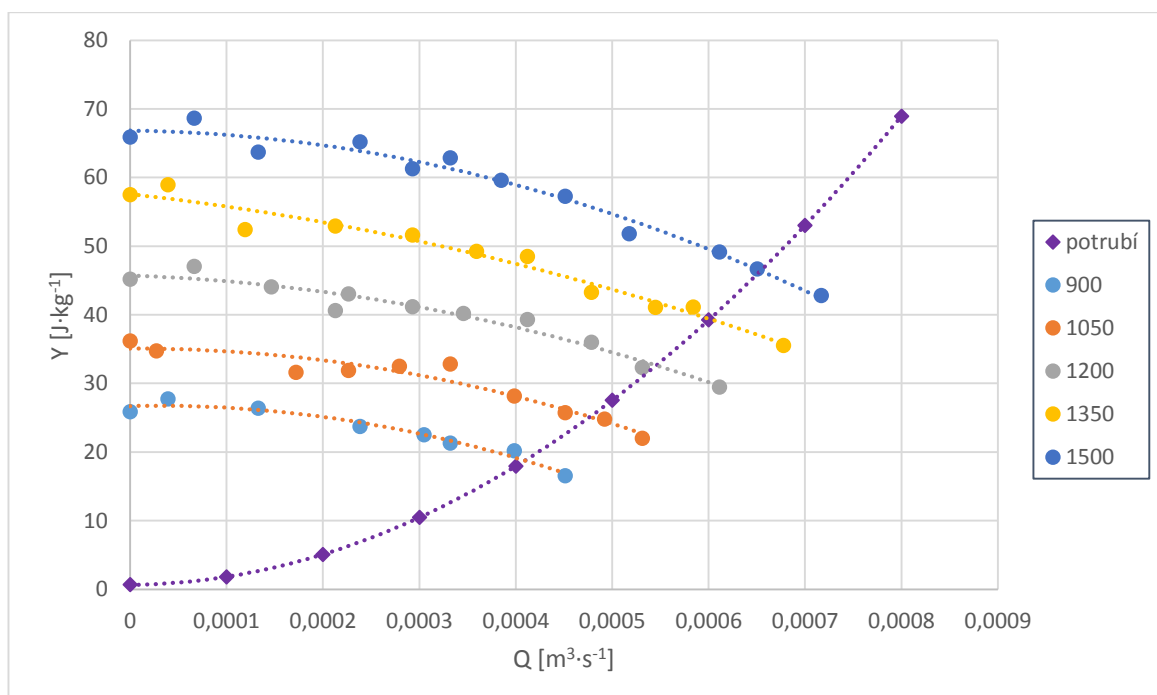
$Y_2$  je měrná energie u pomaluběžného kola.

$n$	$Q_1$	$Q_2$	$Y_1$	$Y_2$
[min <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	[J·kg <sup>-1</sup> ]	[J·kg <sup>-1</sup> ]
1500	0,000621	0,000654	41,90218851	46,39301
1200	0,000506	0,000546	28,210315	32,61924
900	0,000373	0,000409	15,73648865	18,75877

Tabulka 6 Souřadnice provozních bodů stendu Armfield FM50

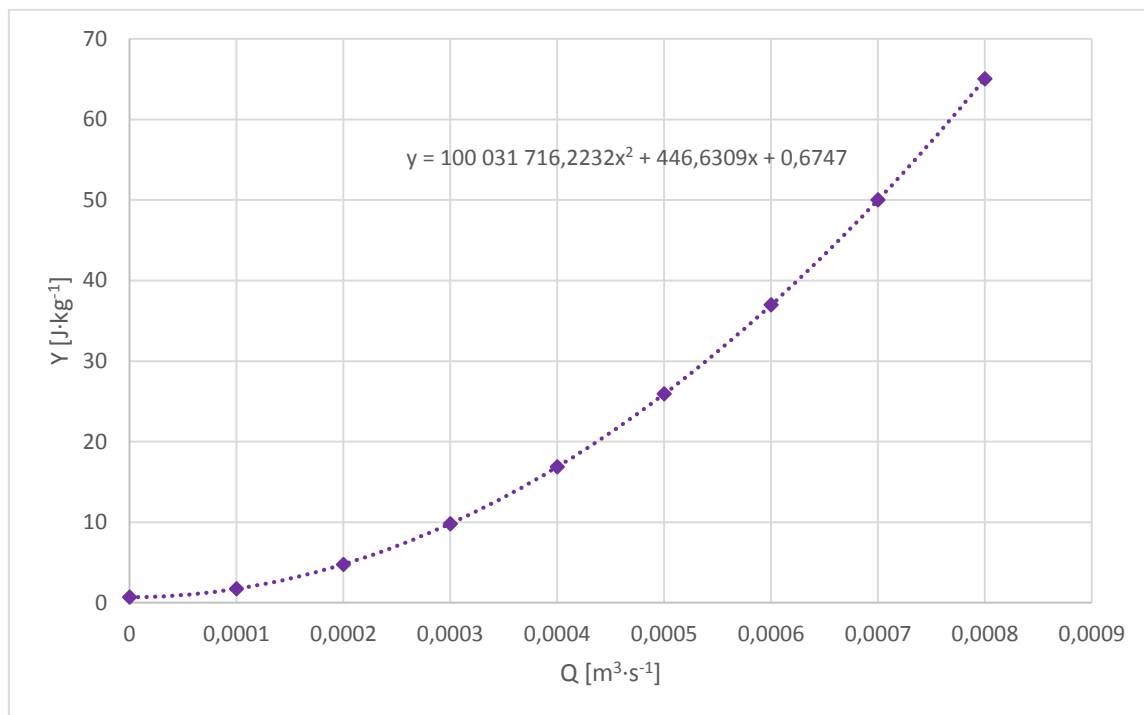


Obrázek 42 Charakteristika potrubí FM50 s charakteristikami rychloběžného kola



Obrázek 43 Charakteristika potrubí FM50 s charakteristikami pomaloběžného kola

## 4.2. Potrubí zařízení Armfield FM51



Obrázek 44 Charakteristika potrubí zařízení Armfield FM51

Podobně jako u předchozího potrubí jsem i u potrubí zařízení *Armfield FM51* našel průtoky a měrné energie odpovídající provozním bodům. Průtoky byly opět zjištěny pomocí řešitele v programu *Excel* a poté byly dosazeny do rovnice potrubí. Hodnoty provozních bodů pro 3 zvolené otáčky ( $1620 \text{ min}^{-1}$ ,  $1440 \text{ min}^{-1}$  a  $1260 \text{ min}^{-1}$ ) jsou vyobrazeny v následující tabulce, kde:

$Q_1$  je průtok u rychloběžného kola,

$Q_2$  je průtok u pomaloběžného kola,

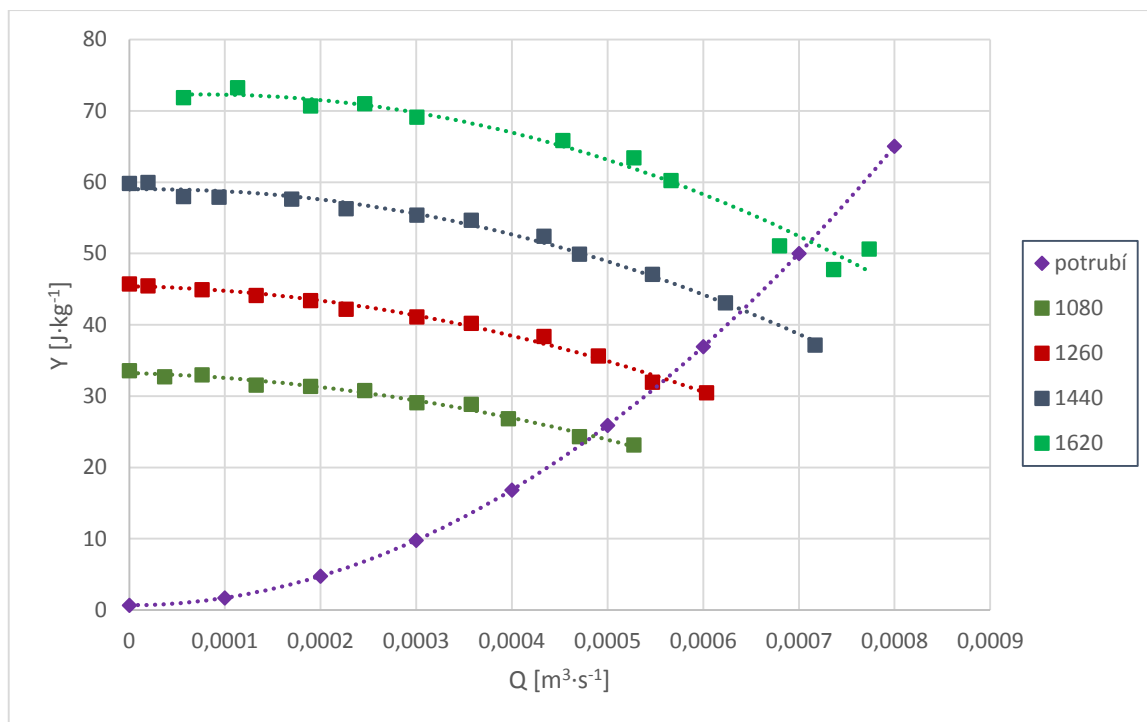
$Y_1$  je měrná energie u rychloběžného kola a

$Y_2$  je měrná energie u pomaloběžného kola.

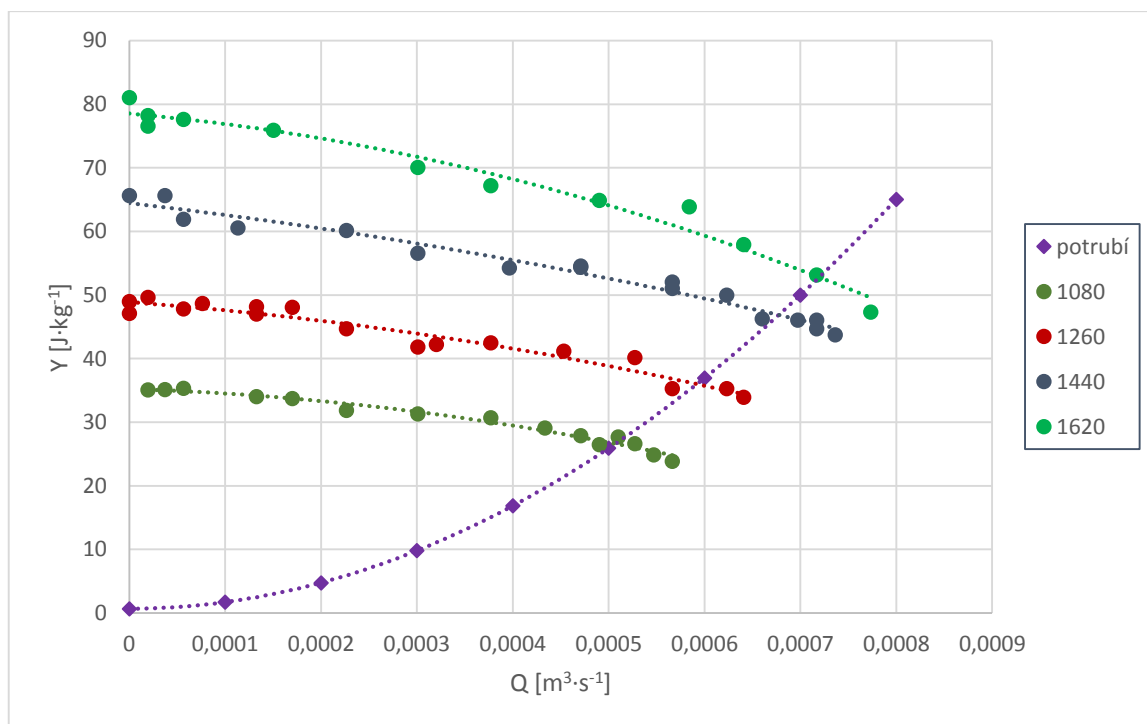
$n$	$Q_1$	$Q_2$	$Y_1$	$Y_2$
$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
1620	0,000712	0,00072	51,68883	52,80406
1440	0,000641	0,000677	42,0747	46,86787
1260	0,000561	0,000592	32,38166	36,00235

Tabulka 7 Souřadnice provozních bodů na stendu Armfield FM51

Při počítání ztrátové energie  $Y_{zs}$  jsem postupoval obdobně jako u stendu *Armfield FM50*.



Obrázek 45 Charakteristika potrubí FM51 s charakteristikami rychloběžného kola



Obrázek 46 Charakteristika potrubí FM51 s charakteristikami pomaloběžného kola

## 5. Závěr

V této bakalářské práci jsem měl za úkol se detailně obeznámit s demonstračním zařízením *Armfield FM50* včetně jeho softwarového vybavení pro měření čerpadlových charakteristik jednoho čerpadla při různých otáčkách a stendem *Armfield FM51*, na kterém jdou měřit i charakteristiky dvou čerpadel pracujících buď paralelně nebo sériově dle polohy třicestného ventilu. Pro tuto práci bylo ale použito pouze nejjednodušší varianty měření, což je měření jednoho čerpadla. U zařízení *Armfield FM50* se během prvního měření rozbil kryt čerpadla (Obrázek 17), proto jsou hodnoty převzaty z předešlé práce na standu. Rozsah otáček u standu *Armfield FM50* je rozdílný od rozsahu otáček standu *Armfield FM51*. Na standu *Armfield FM50* se měřilo v rozsahu otáček  $n = 900 \text{ min}^{-1}$  až  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ , tudíž 60 – 100 % maximálních otáček. Oproti tomu na demonstračním zařízení *Armfield FM51* jsem měřil v rozsahu otáček od  $n = 1080 \text{ min}^{-1}$  až  $n = 1620 \text{ min}^{-1}$ , což je 60 – 90 % maximálních otáček. Při nižších otáčkách dochází při měření k velkým nepřesnostem.

Dalším úkolem bylo vyhodnotit čerpadlové charakteristiky a porovnat je pro 2 odlišné stendy a 2 typy oběžného kola (oběžné kolo s lopatkou zahnutou dozadu – rychloběžné a oběžné kolo s lopatkou zahnutou dopředu – pomaluběžné). Z porovnání grafu měrných energií v závislosti na průtoku (Obrázek 31, 32) lze pozorovat, že hodnoty měrné energie u pomaluběžného kola jsou vyšší než u rychloběžného, avšak z porovnání příkonů (Obrázek 33, 34) je zřejmé, že pomaluběžné kolo potřebuje větší příkon a pracuje tedy s menší účinností (Obrázek 35, 36). Toto platí pro oba stendy, přestože v absolutních hodnotách se měření liší. Základním rozdílem jsou hodnoty příkonů a účinností naměřené na obou stendech. Při prozkoumání porovnání čerpadlových charakteristik na obou stedech (Obrázek 37, 38) si můžeme všimnout, že charakteristiky při srovnatelných otáčkách ( $n = 1050 \text{ min}^{-1}$  a  $n = 1080 \text{ min}^{-1}$ ) při stejném typu oběžného kola mají minimální výchylku. Charakteristiky standu *Armfield FM50* jsou ale strmější.

Dílčím cílem bylo určit provozní body při vybraných otáčkách. V závěru byly porovnány charakteristiky při stejných otáčkách na standu *Armfield FM50* naměřené při otáčkách  $n = 1200 \text{ min}^{-1}$  a na standu *Armfield FM51* přepočtené z nejbližších vyšších otáček ( $n = 1260 \text{ min}^{-1}$ ). Z porovnání obou křivek bylo zjištěno, že křivka naměřená na zařízení *Armfield FM50* je strmější, jsou porovnatelné se zanedbatelnou chybou maximálně 5 – 10 % (Obrázek 39, 40).

### **Poděkování**

Touto formou bych chtěl srdečně poděkovat paní doc. Ing. Sylvě Drábkové, Ph.D. za morální i odbornou podporu a poskytnutí potřebných materiálů při vypracovávání této bakalářské práce.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] ZAVADIL, Lukáš. *Týmová cvičení z čerpací techniky: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2011. ISBN 978-80-248-2713-1.
- [2] PACIGA, Alexander, Oldrich STRÝČEK a Martin GANČO. *Čerpacia technika: celoštátatna učebnica pre strojnícké fakulty vysokých škôl*. Bratislava: Alfa, 1984. Edícia strojárskej literatúry (Alfa).
- [3] MELICHAR, Jan, Jaroslav BLÁHA a Karel BRADA. *Hydraulické stroje: konstrukce a provoz*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2657-4.
- [4] BLÁHA, Jaroslav a Karel BRADA. *Průručka čerpací techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1626-9.
- [5] BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace podle dokumentů ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2 část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typů dokumentů*. [online], Datum poslední revize 11.11.2004. Dostupné z < <http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf> >
- [6] KOCUR, Jan. *Vyšetření vlivu tvaru lopatky radiálního oběžného kola na charakteristiky odstředivého čerpadla s využitím numerického modelování proudění: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2012, 74 s. Vedoucí práce: Drábková, S.
- [7] ARMFIELD, Limited. *Centrifugal Pump Demonstration Unit: Instruction Manual FM50*. ISSUE 5. Bridge House West Street Ringwood Hampshire England BH24 1DY, 2011.
- [8] ARMFIELD, Limited. *Series and Parallel Pumps Demonstration Unit: Instruction Manual FM51*. ISSUE 5. Bridge House West Street Ringwood Hampshire England BH24 1DY, 2010.